

การหลอมภาพโดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียดสำหรับการจับคู่บริเวณ



นาย กิตติพงษ์ ฐานะสุนทรฤกษ์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

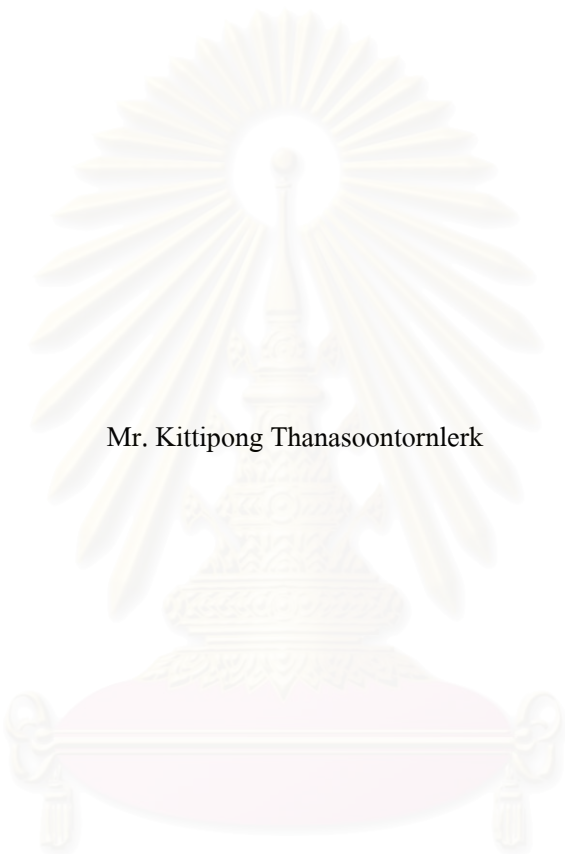
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMAGE MORPHING USING MULTI-RESOLUTIONAL CRITICAL-POINT FILTERS
FOR REGION MATCHING



Mr. Kittipong Thanasoontornlerk

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Computer Science

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหลอมภาพโดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียดสำหรับการจับคู่บริเวณ

โดย

นาย กิตติพงษ์ ฐานะสุนทรฤกษ์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

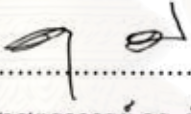
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

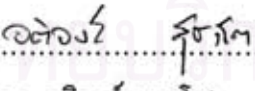

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โปรคปราน บุญยพุกกณะ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อติวงศ์ สุชาโต)

สถาบันวิจัยวิทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติพงษ์ ฐานะสุนทรฤกษ์ : การหลอมภาพโดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียดสำหรับการจับคู่บริเวณ. (IMAGE MORPHING USING MULTI-RESOLUTIONAL CRITICAL-POINT FILTERS FOR REGION MATCHING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.พิษณุ คนองชัยยศ, 78 หน้า.

การหลอมภาพเป็นวิธีการสร้างภาพเคลื่อนไหวที่เป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพดิจิทัลสองภาพที่ไม่เหมือนกัน โดยในปัจจุบันวิธีการหลอมภาพถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น ด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ คอมพิวเตอร์แอนิเมชัน คอมพิวเตอร์วิทัศน์ สื่อโฆษณาหรือในทางภาพยนตร์ การหลอมภาพจะอาศัยวิธีการของการประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพดิจิทัล สองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการบิดเบือนภาพเพื่อหาตำแหน่งหรือจุดที่สอดคล้องของรูปภาพทั้งสอง และขั้นตอนการจางซ้อนภาพโดยการประมาณค่าในช่วงของรูปภาพเพื่อสร้างรูปภาพขึ้นมาใหม่ การใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียด เป็นหนึ่งในวิธีการจับคู่รูปภาพที่มีความถูกต้อง และสามารถจับคู่รูปภาพได้อย่างอัตโนมัติ แต่ตัวกรองจุดวิกฤตมีความซับซ้อนในการคำนวณและความซ้ำซ้อนของข้อมูล ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการปรับปรุงตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียดโดยการนำวิธีการแบบเซตระดับมาใช้ โดยอาศัยหลักการของเซตระดับมาช่วยในการพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่แทนที่จะพิจารณาทุกจุดจากรูปภาพ ซึ่งสามารถจับคู่ตำแหน่งของภาพได้อย่างเหมาะสม และสามารถที่จะลดเวลาในการคำนวณลง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา: วิศวกรรมคอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่อนิติ: กิตติพงษ์ ฐานะสุนทรฤกษ์.....
สาขาวิชา: วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่ออ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ปีการศึกษา: 2551.....

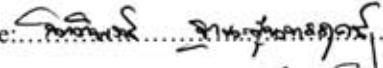
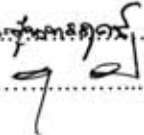
4870221721 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEY WORD: IMAGE METAMORPHOSIS / IMAGE MORPHING / MULTI-RESOLUTIONAL
CRITICAL-POINT FILTERS / IMAGE LEVEL SET / IMAGE MATCHING

KITTIPONG THANASOONTOORNLERK: IMAGE MORPHING USING MULTI-
RESOLUTIONAL CRITICAL-POINT FILTERS FOR REGION MATCHING. THESIS PRINCIPAL
ADVISOR: ASST.PROF. PIZZANU KANONGCHAIYOS, Ph.D, 78 pp.

Image metamorphosis, commonly known as image morphing, is a generally defined as the animated transformation of one digital image to another. Image morphing is used in many fields such as computer visions, computer animations, computer graphics, advertisements and movies. Image morphing involves the image processing techniques of warping and cross-dissolving. Warping is defined as a method in which the pixels in one image should be mapped to the pixels in the other. Cross-dissolving is a method in which the linear interpolation to fade from one image to the other. The multi-resolutional critical point filters (CPF) enable automatic matching of two images. However, the computational cost of CPFs is still very expensive due to its complexity. This research proposes an enhancement of CPFs algorithm using image level set. Input images are divided into several sets having same energy level. The experimental results show that the proposed algorithm can automatically match images accurately with less computational time.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: Computer Engineering Student's signature: 
Field of study: Computer Science Thesis Principal Advisor's signature: 
Academic year: 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยเพราะได้รับคำแนะนำ และคำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ คนองชัยยศ ซึ่งเป็นผู้ที่เสียสละเวลาคอยให้คำแนะนำแนวทางและคอยให้คำปรึกษา ทำให้เกิดเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้เกียรติเสียสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และชี้แจงถึงข้อบกพร่องรวมถึงแนะนำแนวทาง ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยอย่างเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการชั้น 20 ซึ่งเป็นสถานที่ในการทำวิจัย รวมไปถึงเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ กำลังใจ และคอยผลักดันจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง | ฌ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| | |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 4 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 4 |
| 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 5 |
| 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 5 |
| 1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย | 5 |
| 1.8 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ | 6 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1.1 การจางซ้อนภาพ..... | 7 |
| 2.1.2 พีระมิดของภาพ..... | 8 |
| 2.1.3 ตัวกรองจุดวิกฤต | 9 |
| 2.1.3.1 ลักษณะของตัวกรองจุดวิกฤต | 10 |
| 2.1.3.2 ลำดับชั้นความละเอียดของภาพ | 11 |
| 2.1.3.3 ค่าพลังงานที่ใช้ในการจับคู่จุดภาพ | 13 |
| 2.1.4 เซตระดับ | 15 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 17 |
| 2.2.1 วิธีการหลอมภาพโดยผู้ใช้กำหนดและจับคู่คุณลักษณะ | 18 |
| 2.2.1.1 วิธีการกำหนดคู่คุณลักษณะโดยตารางเมฆ | 18 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.1.2 | วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยเส้น | 19 |
| 2.2.1.3 | วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยจุด | 20 |
| 2.2.2 | วิธีการหลอมภาพโดยใช้อัลกอริทึมในการกำหนดจุดและจับคู่คุณลักษณะ..... | 20 |
| 2.2.2.1 | วิธีการหลอมภาพโดยเอพดีเอ็นเอ็น | 21 |
| 2.2.2.2 | วิธีการหลอมภาพโดยตัวกรองจุดวิกฤต | 22 |
| 3 | การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตและเซตระดับ..... | 25 |
| 3.1 | การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤต..... | 25 |
| 3.1.1 | การพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่..... | 27 |
| 3.1.2 | การพิจารณาหาค่าพลังงาน | 28 |
| 3.1.3 | การพิจารณาเงื่อนไขแบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึง..... | 28 |
| 3.1.1 | การปรับตำแหน่ง..... | 29 |
| 3.2 | การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ..... | 30 |
| 3.2.1 | การคำนวณหาเซตระดับของภาพ | 30 |
| 3.2.2 | การนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต..... | 32 |
| 4 | การเปรียบเทียบผลการทดลอง..... | 34 |
| 4.1 | ภาพที่ใช้ในการทดลอง..... | 35 |
| 4.2 | ผลการทดลอง..... | 39 |
| 4.2.1 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 1 | 37 |
| 4.2.2 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 2 | 43 |
| 4.2.3 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 3 | 47 |
| 4.2.4 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 4 | 51 |
| 4.2.5 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 5 | 55 |
| 4.2.6 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 6 | 59 |
| 4.2.7 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 7 | 63 |
| 4.2.8 | ผลการทดลองของภาพชุดที่ 8 | 67 |
| 4.3 | วิเคราะห์ผลการทดลอง | 71 |
| 5 | สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ | 74 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 74 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 75 |
| | รายการอ้างอิง | 76 |
| | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 78 |

| | |
|---|----|
| 5.1 ตารางเปรียบเทียบวิธีการหลอมภาพ..... | 75 |
|---|----|



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ตัวอย่างงานที่นำวิธีการหลอมภาพมาใช้ในด้านภาพยนตร์..... | 1 |
| 1.2 ตัวอย่างการหลอมภาพโดยใช้วิธีการจางซ้อนภาพ | 2 |
| 1.3 ตัวอย่างการหลอมภาพโดยใช้เทคนิคการบิดเบือนภาพร่วมกับการจางซ้อนภาพ | 3 |
| 2.1 ตัวอย่างภาพแสดงความสัมพันธ์ของการจางซ้อนภาพกับเวลา..... | 8 |
| 2.2 ตัวอย่างของการสร้างพีระมิดของภาพ..... | 8 |
| 2.3 เปรียบเทียบการกรองของตัวกรองแบบจุดวิกฤตและตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่ลำดับชั้น ความละเอียดชั้นเดียวกัน | 9 |
| 2.4 แสดงแผนภาพขั้นตอนการหลอมภาพโดยตัวกรองจุดวิกฤต..... | 10 |
| 2.5 ภาพที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองจุดวิกฤต..... | 11 |
| 2.6 การกรองข้อมูลของตัวกรองจุดวิกฤต (ก) แสดงตัวอย่างของการสร้างภาพย่อย (ข) แสดง ตัวอย่างของการสร้างลำดับชั้น | 11 |
| 2.7 ตัวอย่างลำดับชั้นความละเอียดของรูป..... | 12 |
| 2.8 ตัวอย่างรูปภาพต้นฉบับและรูปผลลัพธ์ที่ได้จากการผ่านตัวกรองแบบจุดวิกฤตในแต่ละ ลำดับชั้น | 12 |
| 2.9 (ก) ผลลัพธ์ของการคอนโวลูชัน M_h (ข) ผลลัพธ์ของการคอนโวลูชัน M_v (ค) ขอบของ ภาพที่ได้ | 14 |
| 2.10 ตัวอย่างของวิธีการเซตระดับ | 16 |
| 2.11 แสดงตัวอย่างของวิธีการเซตระดับใน 2 มิติ | 16 |
| 2.12 แสดงตัวอย่างของวิธีการเซตระดับใน 3 มิติ | 17 |
| 2.13 แผนภาพการจัดหมวดหมู่วิธีการหลอมภาพ 2 มิติ | 17 |
| 2.14 ตัวอย่างวิธีการตารางเมฆแบบสามเหลี่ยมในการหลอมภาพ..... | 18 |
| 2.15 ตัวอย่างวิธีการตารางเมฆแบบสี่เหลี่ยมในการหลอมภาพ | 19 |
| 2.16 วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยการใช้เส้น..... | 20 |
| 2.17 วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยการใช้จุด..... | 20 |
| 2.18 วิธีการกำหนดจุดโดยวิธีเอฟดีเอ็นเอ็น | 21 |
| 2.19 ตัวอย่างวิธีการกำหนดจุดโดยวิธีเอฟดีเอ็นเอ็น | 21 |
| 2.20 ตัวอย่างของการใช้ซีพีเอฟ (ก) ภาพที่มองจากทางด้านซ้าย (ข) ภาพที่มองจากทาง ด้านขวา (ค) ภาพที่ได้จากการประมาณค่าของภาพทั้งสองที่ผ่านการจับคู่แล้ว..... | 22 |
| 2.21 ตัวอย่างการหลอมภาพโดยซีพีเอฟ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพปลายทาง(ค) ภาพที่ได้จาก | |

การประมาณค่าในช่วง..... 22

2.22 การใช้ซีพีเอฟในวิดิทัศน์ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพปลายทาง (ค) ภาพที่ทำการสร้างขึ้น
 ขึ้นมา 23

2.23 การตรวจจับวัตถุที่กล้องมีการหมุน 23

2.24 (ก) หน้าต่างของ ภาพต้นฉบับ (ข) หน้าต่างที่จับคู่ได้ในภาพปลายทาง 24

3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหลอมภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤต..... 25

3.2 ลำดับการจับคู่ในแต่ละลำดับชั้นของความละเอียดของภาพ..... 26

3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจับคู่จุดภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤตในแต่ละลำดับชั้นของความ
 ละเอียด 26

3.4 ขอบเขตในการจับคู่ของจุดภาพ $p_{(i,j)}^{(m,s)}$ 27

3.5 เงื่อนไขแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั่วถึง 28

3.6 ภาพตัวอย่างการปรับตำแหน่ง 29

3.7 การแบ่งเซตระดับ 30

3.8 ตัวอย่างการหาเซตระดับของภาพในแต่ละลำดับชั้น 31

3.9 ตัวอย่างเซตระดับของภาพและเส้นรอบบริเวณที่สร้างจากเซตระดับ 32

3.10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจับคู่จุดภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในแต่ละ
 ลำดับชั้นของความละเอียด 33

3.11 การใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเลเวลเซตในขั้นตอนการพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ใน
 การจับคู่..... 33

4.1 แสดงภาพชุดที่ 1 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 35

4.2 แสดงภาพชุดที่ 2 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 35

4.3 แสดงภาพชุดที่ 3 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 36

4.4 แสดงภาพชุดที่ 4 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 36

4.5 แสดงภาพชุดที่ 5 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 37

4.6 แสดงภาพชุดที่ 6 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 37

4.7 แสดงภาพชุดที่ 7 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 38

4.8 แสดงภาพชุดที่ 8 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่ 38

4.9 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 1 39

4.10 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 1 40

4.11 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 2 43

4.12 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 2 44

4.13 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 3 47

| | | |
|------|---|----|
| 4.14 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 3..... | 48 |
| 4.15 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 4..... | 51 |
| 4.16 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 4..... | 52 |
| 4.17 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 5..... | 55 |
| 4.18 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 5..... | 56 |
| 4.19 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 6..... | 59 |
| 4.20 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 6..... | 60 |
| 4.21 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 7..... | 63 |
| 4.22 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 7..... | 64 |
| 4.23 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 8..... | 67 |
| 4.24 | แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 8..... | 68 |
| 4.25 | เปรียบเทียบการจับคู่ของภาพชุดที่ 1..... | 72 |
| 4.26 | เปรียบเทียบภาพประมาณค่าในช่วงของภาพชุดที่ 1..... | 72 |
| 4.27 | เปรียบเทียบการจับคู่ของภาพชุดที่ 2..... | 73 |
| 4.28 | เปรียบเทียบภาพประมาณค่าในช่วงของภาพชุดที่ 2..... | 73 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาพเคลื่อนไหวหรือแอนิเมชัน (Animation) เกิดจากการนำชุดภาพนิ่งที่สร้างไว้มาเรียงลำดับกันอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดเป็นการเคลื่อนไหวบนแผ่นระนาบอาศัยหลักการ “ความต่อเนื่องของการมองเห็น” หรือปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ภาพติดตา” โดยกระบวนการรับรู้ภาพของมนุษย์จะใช้เวลาในการมองเห็นวัตถุที่ปรากฏตรงหน้าประมาณ 24 ภาพใน 1 วินาที ดังนั้นถ้ามีภาพนิ่งมาแสดงต่อเนื่องในช่วงเวลาดังกล่าว (24 ภาพมาแสดงภายใน 1 วินาที) จะทำให้มนุษย์มองเห็นภาพเคลื่อนไหวได้ [1] ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างภาพเคลื่อนไหวโดยอาศัยหลักการประมาณค่าในช่วงหรืออินเตอร์โพลชัน (Interpolation) ซึ่งเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การประมาณค่าระหว่างตัวเลขสองตัว นำมาใช้ในการประมาณค่าระหว่างภาพแรกกับภาพสุดท้าย โดยทำการสร้างภาพขึ้นมาทีละภาพหรือเฟรม (Frame) ระหว่างเฟรมแรกกับเฟรมสุดท้าย วัตถุในภาพที่ได้ระหว่างเฟรมจะมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ละน้อย

การเปลี่ยนแปลงภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเรียกว่า การหลอมภาพหรือการมอร์ฟ (Morphing, Metamorphosis) [2, 3, 4, 5] ซึ่งในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านภาพยนตร์ โฆษณา รวมไปถึงทางด้านการแพทย์ เป็นต้น ตัวอย่างงานที่ได้นำวิธีการของการหลอมภาพมาใช้ยกตัวอย่าง เช่น ในมิวสิกวิดีโอแบล็คออร์ไวท์ (Black or White) ของไมเคิล แจ็กสัน (Michael Jackson) ต่อมาในปี ค.ศ. 1989 ได้นำวิธีการนี้มาใช้ในด้านโฆษณา เช่น โฆษณาของบริษัทเอ็กซอน (Exxon) และในปี ค.ศ. 1991 ได้นำวิธีการนี้มาใช้ในด้านภาพยนตร์ เช่น เรื่อง อินเดียน่า โจนส์ แอนด์ เดอะ ลาสต์ ครูเซดส์ (Indiana Jones and the Last Crusade)



(ก) ภาพจากภาพยนตร์เรื่อง อินเดียน่าโจนส์ แอนด์ เดอะ ลาสต์ ครูเซดส์



(ข) โฆษณาของบริษัทเอ็กซอน

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างงานที่นำวิธีการหลอมภาพมาใช้ในด้านภาพยนตร์

รากศัพท์ของคำว่ามอร์ฟมาจากภาษากรีกคำว่า *morphe* มีความหมายว่าโครงร่างหรือรูปร่าง การมอร์ฟเป็นเทคนิคการสร้างภาพเคลื่อนไหวที่เป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 ภาพที่ไม่เหมือนกัน ให้เสมือนว่าภาพหนึ่งถูกหลอมละลายกลายเป็นอีกภาพหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงจะไม่สูญเสียความสัมพันธ์ของรูปทรงหรือรูปร่างเดิมในแต่ละเฟรม วิธีการหลอมภาพจะประกอบไปด้วย 2 เทคนิค คือ การบิดเบือนภาพ (Image Warping) และการจางซ้อนภาพหรือการดิสโซลฟ์ (Cross - Dissolving) [2, 5]

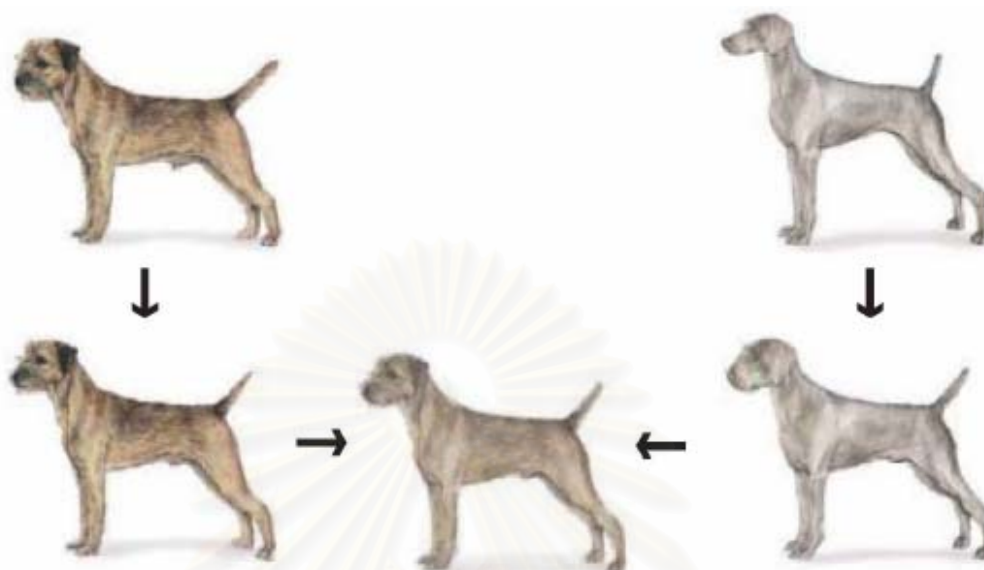
การบิดเบือนภาพ เป็นกระบวนการที่ทำบนภาพ 2 มิติ ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ทำให้รูปร่างของภาพมีการบิดเบี้ยวไปจากรูปร่างเดิม นิยมนำไปใช้ในการเปลี่ยนสัดส่วนภาพของรูปร่างของบุคคลให้แลดูผอมหรืออ้วน ส่วนการจางซ้อนภาพเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่น่าค่าในแต่ละจุดภาพหรือพิกเซล (Pixel) ระหว่างภาพดิจิทัล 2 ภาพมาทำการคำนวณเพื่อสร้างภาพดิจิทัลขึ้นมาใหม่ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีการจางซ้อนภาพไม่ได้เอาหลักเกณฑ์ความเหมือนกัน ความแตกต่างกัน หรือความสอดคล้องกันระหว่างภาพมาใช้ในการคำนวณ จึงเกิดภาพซ้อน (Double exposure) [3, 4] ขึ้นดังรูปที่ 1.2 จะแสดงวิธีการหลอมภาพที่ใช้เทคนิคการจางซ้อนภาพเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาการซ้อนกันของภาพ เนื่องจากคุณลักษณะสำคัญของรูปทั้งสองไม่ได้จัดเรียงกัน ดังนั้นการหลอมภาพจึงได้นำวิธีการบิดเบือนภาพมาใช้ โดยให้รูปภาพทั้งสองบิดเบี้ยวไปตามคุณลักษณะของภาพที่ได้จัดเรียงกันไว้ก่อนหน้านี้นี้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างของการหลอมภาพโดยใช้วิธีการจางซ้อนภาพ

ปัญหาของการหลอมภาพจะอยู่ที่ขั้นตอนการบิดเบือนภาพ ซึ่งจะต้องมีการหาจุดหรือคุณลักษณะที่สอดคล้อง และจับคู่กันระหว่างภาพทั้งสอง วิธีการหลอมภาพในปัจจุบันจะให้ผู้ใช้งานเป็นผู้กำหนดและจับคู่คุณลักษณะที่สอดคล้องกันระหว่างภาพ 2 ภาพ ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเพื่อลดงานของผู้ใช้งานและทำให้ง่ายต่อผู้ใช้งานมากขึ้น เช่น ใช้เส้นตรง เส้นโค้งหรือจุดในการกำหนด และจับคู่คุณลักษณะของภาพ แต่วิธีการหลอมภาพโดยให้ผู้ใช้งานเป็นผู้กำหนดเองนั้นมีข้อเสีย คือ ผลลัพธ์ของการหลอมภาพจะขึ้นอยู่กับทักษะความชำนาญของผู้ใช้งานในการกำหนดและจับคู่คุณลักษณะของภาพให้เหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไป ถ้าผู้ใช้งานกำหนดและจับคู่คุณลักษณะของภาพน้อยเกินไปจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาไม่สมจริง แต่หากว่าผู้ใช้งานกำหนดและจับคู่ของคุณลักษณะมากเกินไปจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก อย่างไรก็ตามมีวิธีหนึ่งในการหลอม

ภาพที่จะทำการจับคู่รูปภาพอัตโนมัติ และได้ผลลัพธ์ที่มีความสมจริง คือ การใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียด (Multiresolutional Critical Point Filters)



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างการหลอมภาพโดยใช้เทคนิควิธีการบิดเบือนภาพร่วมกับวิธีการจางซ้อนภาพ

การใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียดในการหลอมภาพจะใช้ตัวกรองที่เรียกว่า ตัวกรองจุดวิกฤต (Critical-point filters) ตัวกรองนี้จะทำการเก็บรักษาคุณลักษณะเด่นในภาพ และในขณะเดียวกันก็จะทำการสร้างลำดับชั้นของความละเอียดจากระดับที่มีความละเอียดสูง (Fine level) ไปจนถึงระดับที่มีความละเอียดต่ำ (Coarse level) ขั้นตอนต่อมาจะทำการจับคู่จุดที่มีความเหมาะสมระหว่างภาพทั้งสองในแต่ละชั้นจากความละเอียดต่ำไปสู่ความละเอียดสูง โดยการจับคู่จุดแต่ละจุดนั้นจะตัดสินใจและพิจารณาจากค่าพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วย ความเข้มแสง ความสอดคล้องของตำแหน่ง และความเข้มสีของขอบ โดยจุดที่จะถูกจับคู่กันนั้นจะต้องมีค่าพลังงานที่สอดคล้อง และมีความเหมาะสมกัน

อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียดจะพิจารณาจับคู่ตำแหน่งของแต่ละจุดบนภาพในแต่ละลำดับชั้น ทำให้มีความซ้ำซ้อนของข้อมูล และเสียเวลาในการคำนวณ นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาในการจับคู่ส่วนของจุดภาพที่ไม่สามารถจับคู่กันได้อย่างเหมาะสม เช่น บริเวณขอบรูป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงอัลกอริทึมสำหรับการจับคู่ตำแหน่งรูปภาพของการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตหลายความละเอียด โดยอาศัยหลักการของ เซตระดับหรือเลเวลเซต (Level Set) มาช่วยในการพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่แทนที่จะพิจารณาทุกจุดในรูปภาพ ซึ่งสามารถที่จะลดเวลาในการคำนวณลง และสามารถจับคู่ตำแหน่งของภาพได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาหลักการและปรับปรุงวิธีการในการจับคู่ภาพ จากแบบเดิมที่จะพิจารณาทุกจุดในภาพมาเป็นพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่โดยนำหลักการของเซตระดับมาใช้ โดยทำการมองแต่ละลำดับชั้นออกเป็นกลุ่ม เพื่อสามารถ

1. สร้างเส้นรอบบริเวณแต่ละบริเวณได้แบบอัตโนมัติ
2. สามารถจับคู่ตำแหน่งของภาพได้อย่างแม่นยำ
3. ลดเวลาในการคำนวณ โดยลดจำนวนจุดของภาพที่ใช้พิจารณาในการจับคู่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. รูปภาพที่ใช้ในการทดลองจะเป็นภาพ 2 มิติเท่านั้น และภาพที่ใช้ในการทดลองจะผ่านกระบวนการประมวลผลภาพ (Image processing) มาแล้ว เช่น ภาพที่มีสิ่งรบกวนจะต้องทำการเอาสิ่งรบกวนนั้นออกให้เรียบร้อย

2. ขนาดของรูปภาพที่ใช้จะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากัน โดยขนาดของรูปสามารถเขียนให้อยู่ในรูป $2^n * 2^n$ ได้

3. ผลลัพธ์ของการจับคู่ตำแหน่งระหว่างภาพทั้งสองที่ได้จากวิธีการเดิมที่พิจารณาทุกจุดในภาพกับวิธีที่พิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่ โดยนำหลักการของเซตระดับมาใช้ ต้องได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

4. ตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ในสมการหาค่าพลังงานจะกำหนดตามงานวิจัยเดิม และบางตัวจะใช้ค่าที่ได้จากการทดลอง

5. สำหรับภาษาที่ใช้ในการทดลองนี้จะพัฒนาด้วยภาษา แมทแล็บ (MATLAB) [6, 7] ซึ่งจะทำงานบนระบบปฏิบัติการ ไมโครซอฟท์วินโดวส์เอ็กซ์พี (Microsoft Window XP)

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การหลอมภาพ หมายถึง วิธีสร้างภาพเคลื่อนไหวหรือชุดของภาพที่ มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพ 2 ภาพที่ไม่เหมือนกันโดยคอมพิวเตอร์ ประกอบไปด้วย 2 เทคนิค คือ การบิดเบือนภาพ และการจางซ้อนภาพ

ภาพต้นฉบับ (Source image) หมายถึง ภาพเริ่มต้นหรือภาพแรกที่ใช้ในการหลอมภาพระหว่างภาพ 2 ภาพ

ภาพปลายทาง (Destination image) หมายถึง ภาพสุดท้ายหรือภาพที่ 2 ที่ใช้ในการหลอมภาพระหว่างภาพ 2 ภาพ

ภาพระหว่างกลาง (*Intermediate image*) หมายถึง ภาพที่เกิดจากการหลอมภาพระหว่างภาพเริ่มต้นและภาพปลาย ณ เวลาถึงกลางหรือที่ $t = 0.5$ ($0 \leq t \leq 1$)

ภาพประมาณค่าในช่วง (*Interpolated image*) หมายถึง ภาพที่เกิดจากการหลอมภาพระหว่างภาพเริ่มต้นและภาพปลาย ณ เวลาใดๆ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพิ่มประสิทธิภาพในการจับคู่ของตำแหน่งรูปภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการหลอมภาพอัตโนมัติ โดยปรับปรุงวิธีการในการจับคู่ภาพจากแบบเดิมที่จะพิจารณาทุกจุดในภาพ เปลี่ยนมาเป็นพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่โดยนำหลักการของเซตระดับ มองภาพแต่ละลำดับชั้นออกเป็นกลุ่ม ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง สามารถจับคู่รูปภาพได้อย่างแม่นยำ และสามารถที่จะทำเส้นรอบบริเวณแต่ละบริเวณหรือทำการแบ่งกลุ่มได้แบบอัตโนมัติ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งขั้นตอนออกเป็น

1. ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. ออกแบบและสร้างอัลกอริทึมที่เหมาะสม
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อทดสอบอัลกอริทึม
5. ทดสอบเปรียบเทียบผลการทดลอง และปรับปรุงโปรแกรม
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 5 บทหลัก คือ บทนำ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การหลอมภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤตและเซต ระดับ ผลลัพธ์จากการวิจัย และบทสรุปและแนวทางในการพัฒนา โดยในบทแรกจะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาและปัญหาวัตถุประสงค์ ขอบเขตในการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีการดำเนินการวิจัย ลำดับขั้นตอนในการนำเสนองานวิจัย และผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ ต่อมาในบทที่ 2 ได้อธิบายถึงทฤษฎีตัวกรองจุดวิกฤต ทฤษฎีเซต ระดับและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 จะกล่าวถึงขั้นตอนการหลอมภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤต และขั้นตอนการนำเซตระดับเข้ามาใช้ร่วมกับ

ตัวกรองจุดวิกฤตในการหลอมภาพ บทที่ 4 อธิบายถึงผลลัพธ์จากงานวิจัย และในบทสุดท้ายบทที่ 5 อธิบายสรุปผลของงานวิจัยและแนวทางในการพัฒนาต่อเพื่อปรับปรุงงานวิจัย

1.8 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการในหัวข้อเรื่อง “An Image Matching using Critical-Point Filters and Level Set Analysis” โดย นาย กิตติพงษ์ ฐานะสุนทรฤกษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “The 15-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision’2007 (WSCG 2007)”



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะอธิบายทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนที่สองเป็นส่วนองงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะอธิบายงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการหลอมภาพแบบต่างๆ รวมถึงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีต่างๆ

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบไปด้วย การจางซ้อนภาพ พีระมิดของภาพ ตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีการเซตระดับ

2.1.1 การจางซ้อนภาพ

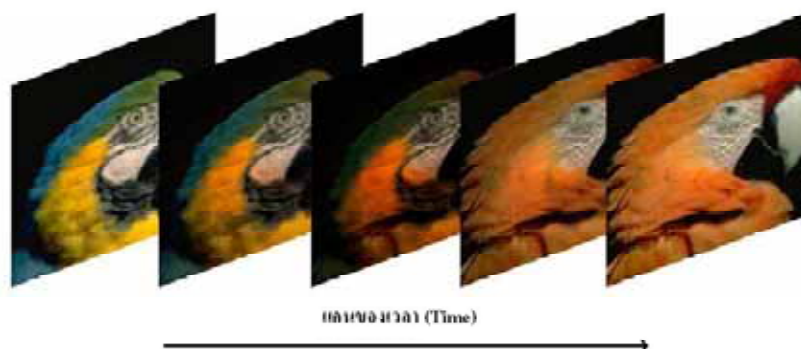
การจางซ้อนภาพหรือการดิสโซล์ฟ [2, 5] เป็นการผสมสี 2 สีเข้าด้วยกัน สำหรับภาพสีจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$r = \frac{w_1 * r_1 + w_2 * r_2}{(w_1 + w_2)} \quad (2.1)$$

$$g = \frac{w_1 * g_1 + w_2 * g_2}{(w_1 + w_2)} \quad (2.2)$$

$$b = \frac{w_1 * b_1 + w_2 * b_2}{(w_1 + w_2)} \quad (2.3)$$

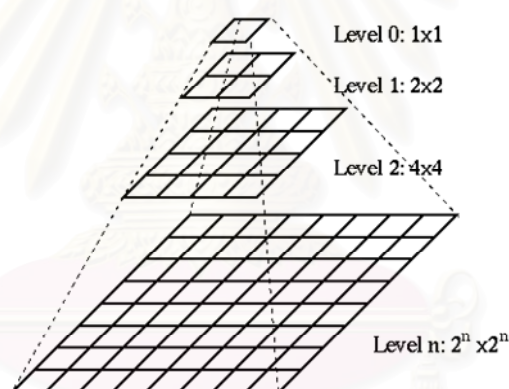
โดยที่ r_1, g_1, b_1 และ r_2, g_2, b_2 เป็นสีของจุดภาพในภาพต้นฉบับ และภาพปลายทาง ตามลำดับ ค่า w_1 และ w_2 เป็นตัวประกอบ (Factor) น้ำหนัก ถ้าค่าน้ำหนักของจุด ในภาพแรกมีค่าเท่ากับศูนย์ สีที่ได้จะเป็นค่าเดียวกับสีในภาพที่สอง และในทางกลับกันถ้าค่าน้ำหนักของจุดภาพ มีค่าเท่ากับศูนย์ สีที่ได้จะเป็นค่าเดียวกับสีในภาพแรก ผลลัพธ์ที่ได้ในเฟรมช่วงแรกจะคล้ายรูปภาพต้นฉบับ ในช่วงตรงกลางจะเป็นรูปที่เกิดจากการผสมของภาพแรกและภาพที่สอง เฟรมช่วงท้ายจะมีลักษณะคล้ายรูปภาพปลายทาง ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างภาพแสดงความสัมพันธ์ของการจางซ้อนภาพกับเวลา

2.1.2 พีระมิดของภาพ (Image pyramid)

พีระมิดของภาพ [8, 9] เป็นการสร้างภาพในลักษณะที่เป็นชั้นของภาพ โดยแต่ละชั้นของภาพจะมีความละเอียดที่ต่างกัน วิธีการสร้างพีระมิดของภาพจะนำภาพไปผ่านตัวดำเนินการแบบเวียนเกิด (Recursive) ขนาดความละเอียดจะลดลง ครั้งหนึ่งจากชั้นก่อนหน้า ตัวอย่างของตัวดำเนินการ เช่น ตัวกรองแบบเกาส์เซียน (Gaussian filter)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของการสร้างพีระมิดของภาพ

ในแต่ละชั้นจะมีความสัมพันธ์แบบพ่อกับลูกกับชั้นอื่นๆ โดยลำดับชั้นที่มีความละเอียดต่ำกว่าจะเป็นพ่อแม่ (Parent) ของลำดับชั้นที่มีความละเอียดสูงกว่าซึ่งจะเป็นลูก (Child) ดังในรูปที่ 2.2 ลำดับชั้นที่ 0 จะเป็นพ่อแม่ของลำดับชั้นที่ 1 ความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนเป็นสมการหาจุดที่เป็นพ่อแม่ของจุด (i, j) ได้ตามสมการที่ (2.4)

$$\text{parent}(i, j) = \left(\left\lfloor \frac{i}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{j}{2} \right\rfloor \right) \quad (2.4)$$

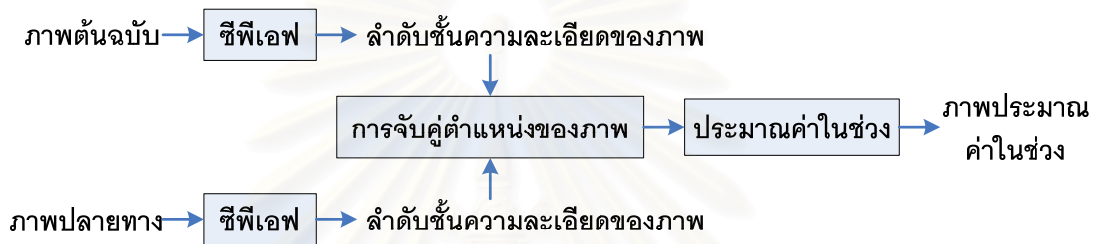
2.1.3 ตัวกรองจุดวิกฤต

ตัวกรองจุดวิกฤต หรือ ซีพีเอฟ (CPFs: Critical point filters) ได้ถูกนำเสนอโดยชินากาวะและคุนิอิ (Shinagawa and Kunii) [10] เป็นตัวกรองแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear filter) ซึ่งจะทำการกรองข้อมูลภาพ และสร้างลำดับชั้นหลายความละเอียดของรูปภาพ (Multiresolution Hierarchies of Image) หรือพีระมิดของภาพทั้งหมดสี่แบบ โดยตัวกรองแบบจุดวิกฤตจะมีข้อได้เปรียบกว่าตัวกรองแบบอื่น คือ จะทำการกรองเอาจุดที่มีความสำคัญหรือลักษณะเด่นเก็บไว้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองแบบอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบการกรองของตัวกรองแบบจุดวิกฤตและตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย ณ ลำดับชั้นความละเอียดชั้นที่ 5 รูปที่ 2.3 (ก) และรูปที่ 2.3 (ข) แสดงรูปภาพต้นฉบับและรูปภาพปลายทาง รูปที่ 2.3 (ค) และ รูปที่ 2.3 (ง) แสดงภาพที่ผ่านการกรองโดยตัวกรองค่าเฉลี่ย (Averaging filter) รูปที่ 2.3 (ง) ถึง (ข) และ รูปที่ 2.3 (ข) ถึง (ค) แสดงภาพที่ผ่านการกรองโดยตัวกรองแบบจุดวิกฤตของรูปภาพต้นฉบับและรูปภาพปลายทางตามลำดับ ตัวกรองจุดวิกฤตที่พัฒนาโดยชินากาวะและคุนิอิจะใช้ระบบสีเป็นแบบสเกลสีเทา (Grayscale) ทำให้ใช้งานได้กับรูปภาพขาวดำเท่านั้น ต่อมาตัวกรองแบบจุดวิกฤตได้ถูกพัฒนาโดยฮาบายะและชินากาวะ (Habaka and Shinagawa) [11] โดยเปลี่ยนมาใช้ระบบสีแบบเฮอเอสไอ (HSI: Hue Saturation intensity) [9] ทำให้สามารถนำมาใช้งานกับภาพสีได้



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการกรองของตัวกรองแบบจุดวิกฤตและตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่ลำดับชั้นความละเอียดชั้นเดียวกัน [10]

การหลอมภาพโดยใช้ตัวกรองแบบจุดวิกฤตจะประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้
ขั้นแรกจะทำการนำรูปภาพมาผ่านตัวกรองแบบจุดวิกฤต เพื่อที่จะสร้างลำดับชั้นความละเอียดของ
ภาพ จากนั้นจะทำการจับคู่หาจุดที่เหมาะสมระหว่างภาพทั้งสอง โดยในขั้นตอนนี้จะพิจารณาจับคู่
จุดในแต่ละลำดับชั้นจากลำดับชั้นที่มีความละเอียดต่ำที่สุด ไปหาลำดับชั้นที่มีความละเอียดสูงที่สุด
(Coarse to fine matching) ในการจับคู่จุดจะทำการหาขอบเขตที่เป็นไปได้ โดยดูจากความสัมพันธ์
ของลำดับชั้นที่มีความละเอียดต่ำกว่า จากนั้นจะพิจารณาหาจุดในขอบเขตซึ่งเป็นจุดที่มีค่าพลังงาน
ต่ำที่สุด หลังจากทำขั้นตอนการจับคู่เสร็จแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการสร้างภาพ โดยอาศัยหลักของ
การประมาณค่าในช่วง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพขั้นตอนการหลอมภาพโดยตัวกรองจุดวิกฤต

2.1.3.1 ลักษณะของตัวกรองจุดวิกฤต

ตัวกรองจุดวิกฤตจะทำการกรองข้อมูลแล้วนำไปสร้างลำดับชั้นของความละเอียด
ของภาพทั้งหมดสี่แบบตามสมการที่ (2.5) ถึงสมการที่ (2.8) ดังรูปที่ 2.5 แสดงภาพเริ่มต้นและภาพ
ที่ผ่านตัวกรองจุดวิกฤต แต่ละภาพที่สร้างขึ้นใหม่จะเรียกว่า ภาพย่อย (Subimage) รูปที่ 2.6 แสดง
ตัวอย่างการกรองข้อมูลของตัวกรองแบบจุดวิกฤต โดยสมมุติค่าในตารางเป็นค่าความเข้มของแสง
กำหนดให้ภาพเริ่มต้นและภาพปลายทางมีขนาดของภาพเท่ากัน คือ ความกว้างเท่ากับ N และความ
ยาวเท่ากับ M โดยที่ $N = M = 2^n$ และกำหนดให้ m เป็นลำดับชั้นของความละเอียด จุดภาพ
(i, j) ของภาพเริ่มต้นแทนด้วย $p_{(i,j)}$

$$p_{(i,j)}^{(m,0)} = \min(\min(p_{(2i,2j)}^{(m+1,0)}, p_{(2i,2j+1)}^{(m+1,0)}), \min(p_{(2i+1,2j)}^{(m+1,0)}, p_{(2i+1,2j+1)}^{(m+1,0)})) \quad (2.5)$$

$$p_{(i,j)}^{(m,1)} = \max(\min(p_{(2i,2j)}^{(m+1,1)}, p_{(2i,2j+1)}^{(m+1,1)}), \min(p_{(2i+1,2j)}^{(m+1,1)}, p_{(2i+1,2j+1)}^{(m+1,1)})) \quad (2.6)$$

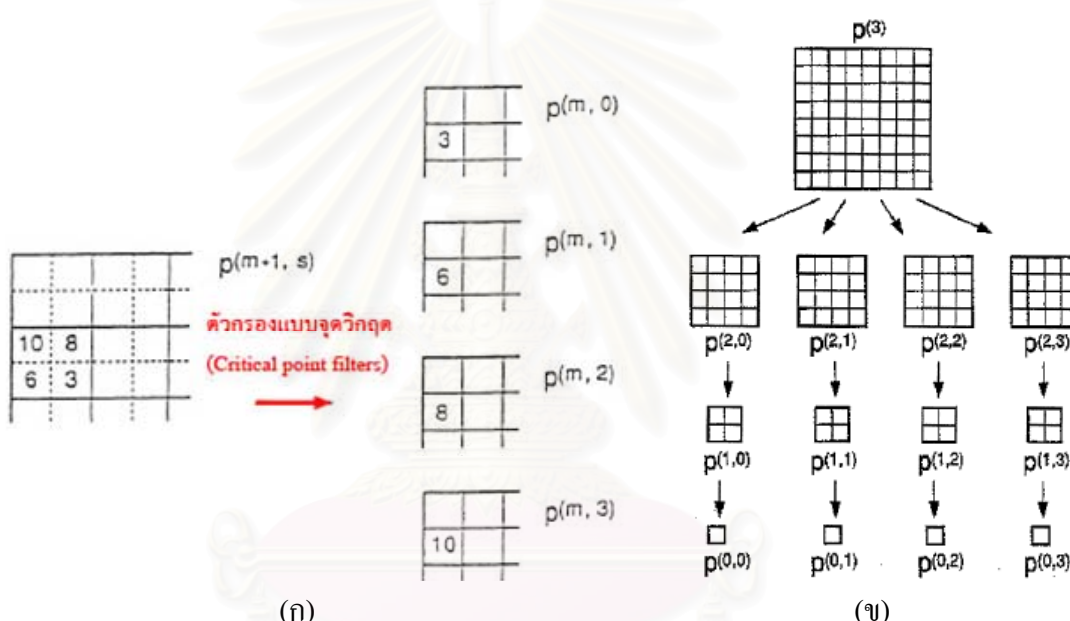
$$p_{(i,j)}^{(m,2)} = \min(\max(p_{(2i,2j)}^{(m+1,2)}, p_{(2i,2j+1)}^{(m+1,2)}), \max(p_{(2i+1,2j)}^{(m+1,2)}, p_{(2i+1,2j+1)}^{(m+1,2)})) \quad (2.7)$$

$$p_{(i,j)}^{(m,3)} = \max(\max(p_{(2i,2j)}^{(m+1,3)}, p_{(2i,2j+1)}^{(m+1,3)}), \max(p_{(2i+1,2j)}^{(m+1,3)}, p_{(2i+1,2j+1)}^{(m+1,3)})) \quad (2.8)$$

โดยที่ $p_{(i,j)}^{(n,0)} = p_{(i,j)}^{(n,1)} = p_{(i,j)}^{(n,2)} = p_{(i,j)}^{(n,3)} = p_{(i,j)}$ และ $(0 \leq m \leq n)$



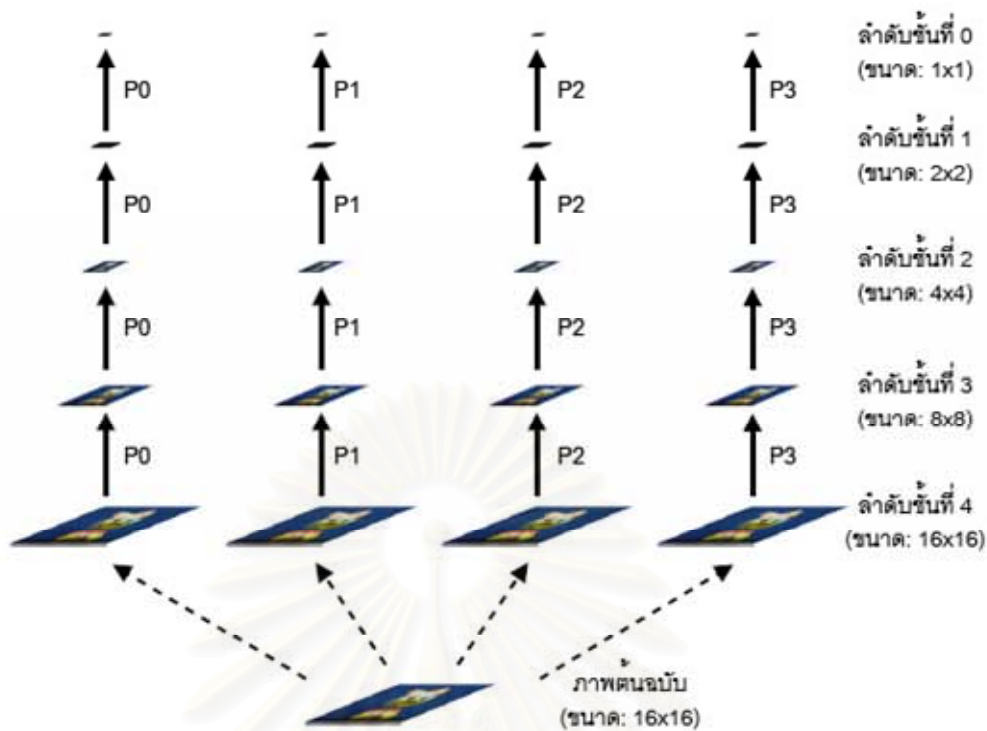
รูปที่ 2.5 ภาพที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองจุดวิกฤต



รูปที่ 2.6 การกรองข้อมูลของตัวกรองจุดวิกฤต (ก) แสดงตัวอย่างของการสร้างภาพย่อย (ข) แสดงตัวอย่างของการสร้างลำดับชั้น

2.1.3.2 ลำดับชั้นความละเอียดของภาพ (Multiresolution Hierarchies of image)

ตัวกรองจุดวิกฤตจะทำการสร้างลำดับชั้นความละเอียดของรูปภาพ โดยถ้ารูปภาพที่มีขนาดเท่ากับ $2^n * 2^n$ เมื่อเรานำรูปภาพไปผ่านตัวกรองจุดวิกฤตซึ่งเป็นตัวกรองเวียนเกิด (Recursive filter) จะสามารถคำนวณการสร้างลำดับชั้นของความละเอียดได้ทั้งหมด n ลำดับชั้น โดยในแต่ละลำดับชั้นที่ m จะมีขนาดของภาพเป็น $2^m * 2^m$ ($0 \leq m \leq n$) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างลำดับชั้นความละเอียดของรูป



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างรูปภาพต้นฉบับและรูปผลลัพธ์ที่ได้จากการผ่านตัวกรองแบบจุดวิกฤตในแต่ละลำดับชั้น

ภาพที่มีความละเอียดเท่ากับ 256*256 จุดภาพ เมื่อนำไปผ่านตัวกรองจุดวิกฤตจะสร้างลำดับชั้นของความละเอียด 8 ลำดับชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความละเอียดของรูปภาพจะเรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ โดยในรูปที่ 2.8 (ก) จะกรองเอาจุดที่มีค่าน้อย ส่วนรูปที่ 2.8 (ข) และรูปที่

2.8 (ค) จะกรองเอาจุดที่เป็นอานม้าสองแบบ คือ ระหว่างค่าน้อยกับค่ามาก และระหว่างค่ามากกับค่าน้อย ตามลำดับ และส่วนรูปที่ 2.8 (ง) จะกรองเอาจุดที่มีค่ามากที่สุด

ตัวอย่างรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าตัวกรองแบบจุดวิฤตจะทำการกรองข้อมูลภาพ และรักษาจุดที่สำคัญของภาพเอาไว้ โดยจาก ตัวอย่างของรูปที่ 2.8 (ก) ตัวกรองจะกรองเก็บรักษารายละเอียดบริเวณที่เป็นฉากหลังเอาไว้ รูปที่ 2.8 (ข) และ 2.8 (ค) ตัวกรองจะกรองเก็บรายละเอียดบริเวณที่เป็นสีผิว และสีเสื้อ ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 2.8 (ง) ตัวกรองจะกรองเก็บรายละเอียดบริเวณเส้นผม ตา และปาก

2.1.3.3 ค่าพลังงานที่ใช้ในการจับคู่จุดของภาพ (Energy of mapping)

กำหนดให้ $p_{(i,j)}$ แทนจุดภาพที่ตำแหน่ง (i, j) ของภาพต้นฉบับ และ $q_{(k,l)}$ แทนจุดภาพตำแหน่ง (k, l) ของภาพปลายทางที่ระดับชั้นใดๆ ค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งจุดภาพ (Mapping) หรือจับคู่จุดภาพระหว่างภาพต้นฉบับและภาพปลายทางจะประกอบไปด้วย ค่าความเข้มของแสง ค่าความสอดคล้องของตำแหน่ง และค่าความเข้มสีของขอบ ซึ่งจะมีการถ่วงน้ำหนักตัวแปรทั้งสามโดยสมมุติให้ $p_{(i,j)}$ เป็นจุดที่จะจับคู่และ $q_{(k,l)}$ เป็นจุดที่จะพิจารณาหาค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดในการจับคู่จุดภาพ

ค่าพลังงานความเข้มแสงและสี (Energy related to the intensity and the color)

ค่าพลังงานความเข้มของแสงและสีเป็นค่าความแตกต่างความเข้มของแสง และความแตกต่างของสีระหว่างจุดภาพที่ภาพต้นฉบับและจุดภาพที่ภาพปลายทางที่ต้องการจะจับคู่ด้วย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.9) โดยที่ค่า ψ เป็นค่าคงที่ (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 10)

$$C = C_I + \psi C_{HS} \quad (2.9)$$

โดยที่ $C_I = (p_{(i,j)} - q_{(k,l)})^2 \quad (2.10)$

$$C_{HS} = |S(p_{(i,j)}) \cos(2\pi H(p_{(i,j)})) - S(q_{(k,l)}) \cos(2\pi H(q_{(k,l)}))|^2 + |S(p_{(i,j)}) \sin(2\pi H(p_{(i,j)})) - S(q_{(k,l)}) \sin(2\pi H(q_{(k,l)}))|^2 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) ตัวแปร S หมายถึงค่าความอิ่มตัวของสี ตัวแปร H หมายถึงเฉดสี และตัวแปร I หมายถึงความเข้มของแสงของระบบสีเอชเอสบีไอ โดยตัวแปรทั้งสามสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12) ถึงสมการที่ (2.14) ซึ่งค่า R, G และ B หมายถึง สีแดง สีเขียว และน้ำเงินของจุดภาพ [7, 9]

$$H = \frac{\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)}\right)}{2\pi} \quad (2.12)$$

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (2.13)$$

$$S = 1 - \frac{\min(R, G, B)}{I} \quad (2.14)$$

ค่าพลังงานความเข้มสีของขอบ (Energy related to the edge)

ค่าพลังงานค่าความเข้มสีของขอบ (ค่า E) เป็นค่าความแตกต่างของค่าสีของขอบ โดยในการหาค่าสีของขอบจะใช้ตัวกรองโซเบล (Sobel filter) เพื่อทำการกรองหาขอบของรูปภาพ [9] ดังสมการ (2.15)

$$E = (edge_{(i,j)}^{(m,h)} - edge_{(k,l)}^{(m,h)})^2 + (edge_{(i,j)}^{(m,v)} - edge_{(k,l)}^{(m,v)})^2 \quad (2.15)$$

ซึ่งค่า $edge_{(i,j)}^{(m,h)}$ และ $edge_{(i,j)}^{(m,v)}$ ในลำดับชั้นต่างๆ (ชั้นที่ m) ของความละเอียดสามารถหาได้ตามสมการที่ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ

$$edge_{(i,j)}^{(m,h)} = \frac{1}{4} (edge_{(2i,2j)}^{(m+1,h)} + edge_{(2i,2j+1)}^{(m+1,h)} + edge_{(2i+1,2j)}^{(m+1,h)} + edge_{(2i+1,2j+1)}^{(m+1,h)}) \quad (2.16)$$

$$edge_{(i,j)}^{(m,v)} = \frac{1}{4} (edge_{(2i,2j)}^{(m+1,v)} + edge_{(2i,2j+1)}^{(m+1,v)} + edge_{(2i+1,2j)}^{(m+1,v)} + edge_{(2i+1,2j+1)}^{(m+1,v)}) \quad (2.17)$$

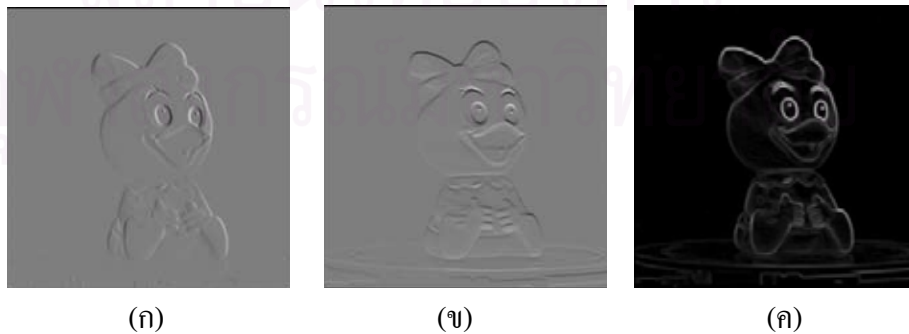
โดยที่ในค่าเริ่มต้นของ $edge_{(i,j)}^{(m,h)}$ และ $edge_{(i,j)}^{(m,v)}$ จะหาตามสมการที่ (2.18) และ (2.19)

$$edge_{(i,j)}^{(n,h)} = p_{(i,j)}^{(n)} \otimes M_h \quad (2.18)$$

$$edge_{(i,j)}^{(n,v)} = p_{(i,j)}^{(n)} \otimes M_v \quad (2.19)$$

ในที่นี้เครื่องหมาย \otimes คือเครื่องหมายสังวัตนาการหรือคอนโวลูชัน (Convolution) ซึ่ง n เป็นค่าของระดับภาพที่มีความละเอียดสูงที่สุด และค่า M_h และ M_v มีค่าดังนี้

$$M_h = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ และ } M_v = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 2.9 (ก) ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการคอนโวลูชัน M_h (ข) ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการคอนโวลูชัน M_v (ค) ขอบของภาพที่ได้

ค่าพลังงานความสอดคล้องของตำแหน่ง (Energy related to the locations)

เพื่อให้การจับคู่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น จึงมีการนำค่าความสอดคล้องของตำแหน่ง (ค่า D) มาใช้ในการพิจารณาด้วย โดยค่า D สามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) โดยที่ค่า η เป็นค่าคงที่ (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มามีค่าเท่ากับ 0.1)

$$D = (\eta D_0 + D_1) \quad (2.20)$$

โดยที่ D_0 เป็นค่าที่ใช้เพื่อไม่ให้เกิดการจับคู่ของจุดภาพที่ไกลเกินไปสามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ (2.21) และ D_1 เป็นค่าที่คำนวณเพื่อให้เกิดความราบเรียบ (Smoothness) ในการจับคู่ โดยจะคำนวณเปรียบเทียบระยะทางที่ถูกจับคู่ของจุดภาพ และจุดภาพข้างเคียง สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการที่ (2.22) โดย $f(i, j)$ เป็นตำแหน่งของจุดภาพในภาพปลายทางที่จับคู่กับจุดภาพ (i, j) ในภาพต้นฉบับ

$$D_0 = \|f^{(m,s)}(i, j) - f^{(m,s-1)}(i, j)\|^2 \quad (2.21)$$

$$D_1 = \sum_{i'=i-1}^{i+1} \sum_{j'=j-1}^{j+1} \|(f^{(m,s)}(i, j) - (i, j)) - (f^{(m,s)}(i', j') - (i', j'))\|^2 \quad (2.22)$$

ค่าพลังงานรวม (The total energy of the mapping)

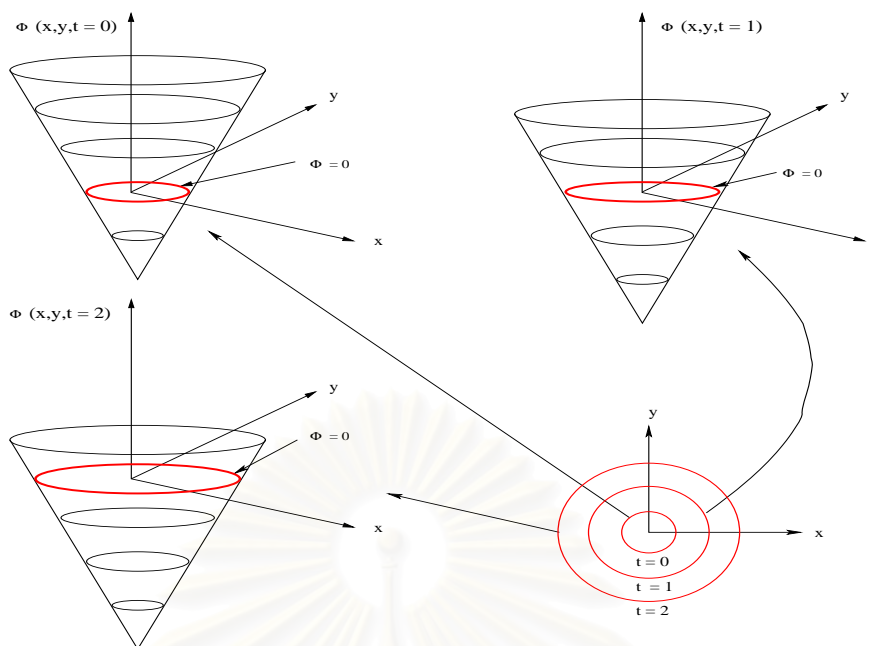
ค่าพลังงานที่ใช้ในการหาจุดที่เหมาะสมในการจับคู่ประกอบไปด้วยผลรวมของค่าความเข้มของแสงและสี ค่าความสอดคล้องของตำแหน่ง และค่าความเข้มสีของขอบ ค่าพลังงานรวมจะหาได้จากสมการที่ (2.23)

$$energy = \lambda C + \zeta D + \theta E \quad (2.23)$$

โดยที่ค่า λ, ζ และ θ เป็นค่าคงที่ (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มามีค่าเท่ากับ 0.1, 1 และ 1 ตามลำดับ)

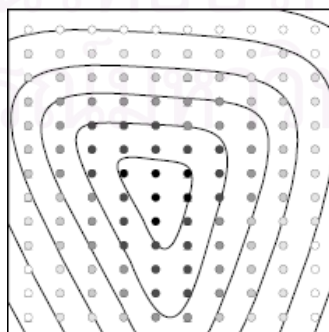
2.1.4. วิธีการเซตระดับ (Level set methods)

วิธีการเซตระดับได้ถูกนำเสนอโดยออสเชอร์ (Osher) และเซเทียน (Sethian) เมื่อปี 1988 [12] สำหรับการทำรูปจำลองบนตารางกริดแบบวิฤต (Discrete grids) โดยการใช้เซตระดับ ซึ่งในแบบจำลองเซตระดับเหมาะสำหรับแบบจำลองเชิงตัวแปรเสริม หรือ พารามตริกซ์โมเดล (Parametric model) แบบจำลองนี้มีความยืดหยุ่น สามารถที่จะแยกและแบ่งบริเวณ วิธีนี้สามารถนำไปใช้ในงานที่หลากหลาย เช่น ติดตามรูปแบบพื้นผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะพยายามติดตามการเคลื่อนที่ของขอบเขตที่ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดของจุดบนขอบภาพไปตามการเคลื่อนที่นั้น งานทางด้านอื่น ได้แก่ การคำนวณทางกายภาพ การประมวลผลภาพ เป็นต้น

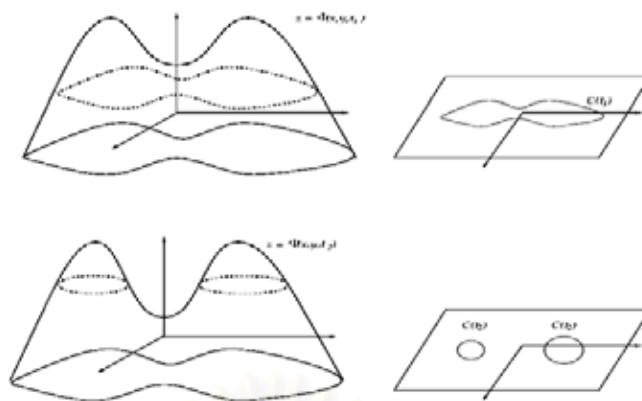


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของวิธีการเซตระดับ

เซตระดับนี้ได้รับเปลี่ยนแนวคิดที่ว่า หากต้องการจะสร้างวงกลมแทนที่จะนำเส้นโค้งมาสร้างเป็นพื้นผิวขึ้น ก็ให้สร้างรูปทรงกรวยในแนวตั้งขึ้นมาก่อน แล้วทำการตัดขวางตามแนวระนาบ XY ในตำแหน่งความโค้งที่ต้องการ ก็จะได้วงกลมนั้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งรูปทรงกรวยนี้ ถูกเรียกว่า ฟังก์ชันเซตระดับ เนื่องจากมันสามารถรับจุดในระนาบใดๆ เป็นข้อมูลนำเข้า (Input) และจะส่งคืนค่าความสูงของพื้นผิวนั้นออกมาเป็นข้อมูลส่งออก (Output) จากแนวคิดนี้ทำให้สามารถใช้ฟังก์ชันเซตระดับสร้างพื้นผิวขอบเขตที่ต้องการได้โดยการเลื่อนรูปทรงขึ้นลงในแนวแกน Z เพื่อให้ได้รูประนาบลักษณะที่ต้องการ และทำการตัดขวางออกมาเป็นขอบเขตที่ต้องการต่อไป วิธีการนี้ยังสามารถหาขอบเขตที่ต้องการในลักษณะที่บิดเบี้ยวได้ โดยการพยายามนำฟังก์ชันเซตระดับหลายๆรูปทรงมารวมเข้าด้วยกัน โดยฟังก์ชันเซตระดับของแต่ละรูปทรงมีรูปแบบไม่ต่างไปจากเดิม



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของวิธีการเซตระดับใน 2 มิติ



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของวิธีการเซตระดับใน 3 มิติ

เซตระดับของฟังก์ชัน (Function) f ของตัวแปร n ตัวแปรสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.24) โดย ϕ เป็นค่าคงที่ สำหรับเลเวตเซตย่อย (sublevel set) ของฟังก์ชัน f เขียนได้ตามสมการที่ (2.25)

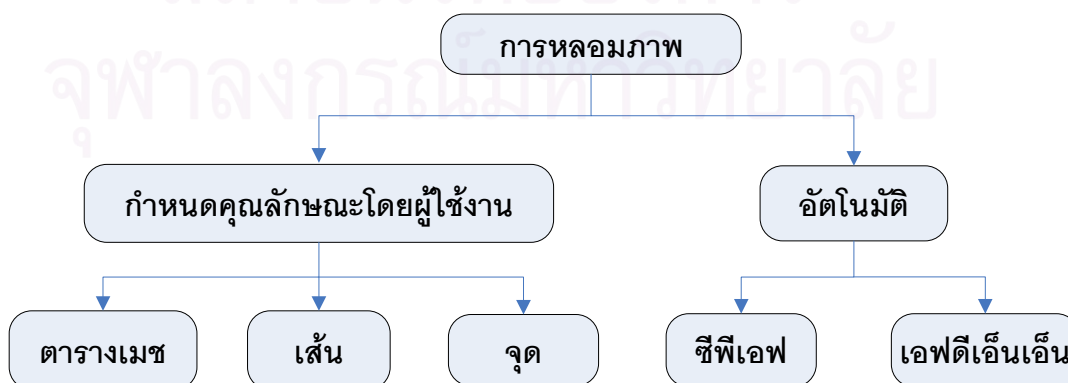
$$\{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n : f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \phi\} \tag{2.24}$$

$$\{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n : f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \phi\} \tag{2.25}$$

เมื่อตัวแปร $n = 2$ จะเรียกว่า ระดับเส้นโค้ง (Level curve, Contour line) ดังรูปที่ 2.11 เมื่อ $n = 3$ จะเรียกว่า ระดับพื้นผิว (Level surface) ดังรูปที่ 2.12 และสำหรับค่า n ที่สูงกว่าสองจะเรียกว่า ไฮเปอร์เซอร์เฟซ (Hyper surface)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาลอมภาพ 2 มิติสามารถแบ่งออกได้ตามวิธีในการกำหนดและจับคู่คุณลักษณะที่สอดคล้องกันระหว่างภาพ 2 ภาพ โดยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ให้ผู้ใช้งานกำหนดและจับคู่คุณลักษณะ และกลุ่มที่ใช้อัลกอริทึมกำหนดและจับคู่คุณลักษณะโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพการจัดหมวดหมู่วิธีการหาลอมภาพ 2 มิติ



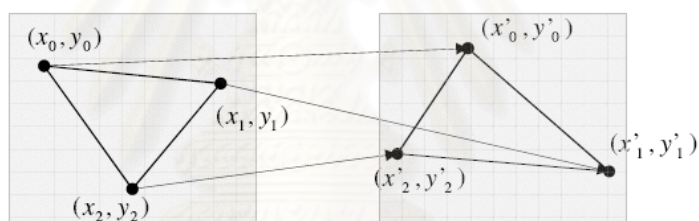
รูปที่ 2.13 แผนภาพการจัดหมวดหมู่วิธีการหาลอมภาพ 2 มิติ

2.2.1 วิธีการห่อมภาพโดยผู้กำหนดและจับคู่คุณลักษณะ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการห่อมภาพโดยให้ผู้กำหนดและจับคู่คุณลักษณะสามารถที่จะแบ่งได้ตามประเภทของวิธีที่ให้ผู้กำหนดคุณลักษณะ 3 แบบ คือ การใช้ตารางเมฆ การใช้เส้น และการใช้จุด

2.2.1.1 วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยตารางเมฆ

วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยใช้ตารางเมฆจะทำการสร้างตารางเมฆขึ้นมา เพื่อใช้เป็นจุดหลักหรือจุดที่ใช้ในการควบคุมการห่อมภาพ ซึ่งผู้ที่จะทำการปรับตารางเมฆให้เหมาะสมกับภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตารางเมฆมาใช้การห่อมภาพ ได้แก่ งานวิจัยของอาร์เธอร์ อาร์เดเชอร์ กอชแทสบี (Arthur Ardeshir Goshtasby) [13] นำเสนอการใช้ตารางเมฆแบบสามเหลี่ยมในการห่อมภาพร่วมกับการแปลงสัมพรรค (affine transformation) [9] ดังรูปที่ 2.14 และในงานวิจัยของจอร์จ โวลเบิร์ก (George Wolberg) [4] นำเสนอการใช้ตารางเมฆแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.15

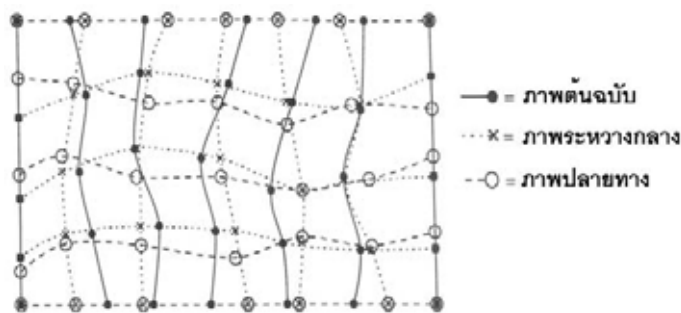


(ก) การจับคู่ของจุดในวิธีการตารางเมฆแบบสามเหลี่ยม



(ข) ผลลัพธ์ของการห่อมภาพโดยวิธีการตารางเมฆแบบสามเหลี่ยม

รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวิธีการตารางเมฆแบบสามเหลี่ยมในการห่อมภาพ



(ก) การจับคู่ของจุดในวิธีการตารางเมชแบบสี่เหลี่ยม



(ข) ผลลัพธ์ของการห่อมภาพ โดยวิธีการตารางเมชแบบสี่เหลี่ยม [4]

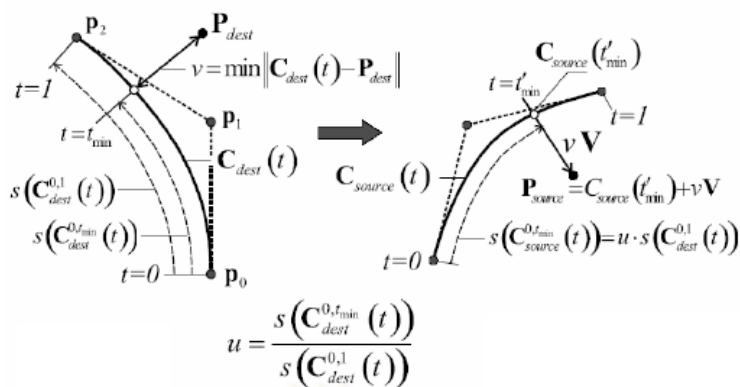
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างวิธีการตารางเมชแบบสี่เหลี่ยมในการห่อมภาพ

วิธีการห่อมภาพโดยใช้ตารางเมชมีข้อได้เปรียบในเรื่องความเร็วของการคำนวณ เนื่องจากภาพถูกแบ่งออกเป็นตารางเมชจึงคำนวณเฉพาะแค่เมชของตัวเอง ข้อจำกัดของวิธีการห่อมภาพโดยใช้ตารางเมช คือ โครงสร้าง (Topology) ของภาพทั้งสองจะต้องเหมือนกัน

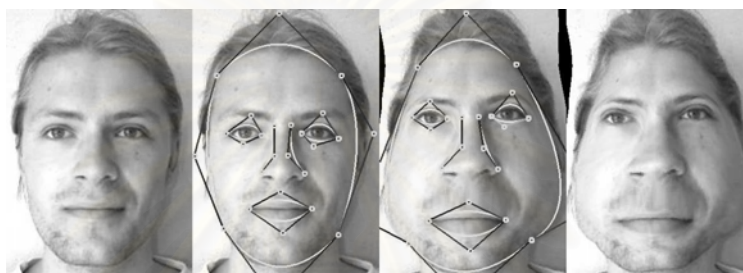
2.2.1.2 วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยเส้น

วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยเส้นจะทำการสร้างเส้น โดยเส้นที่สร้างจะใช้แทนคุณลักษณะที่สำคัญหรือจุดเด่นของภาพจากนั้นผู้ใช้จะทำการจับคู่เส้น งานวิจัยของธัตเดอัส บีแอร์ (Thaddeus Beier) และชอว์น นีลีย์ (Shawn Neely) [14] เป็นงานวิจัยแรกที่ได้นำเสนอวิธีการห่อมภาพโดยใช้เส้นตรง ต่อมาได้มีงานวิจัยของ เฮอ์แมนน์ เบิร์กฮอลซ์ (Hermann Birkholz) และเดียมมา แจคเคิล (Dietmar Jackel) [15] ได้พัฒนาเปลี่ยนจากการใช้เส้นตรงมาเป็นเส้นโค้ง เพื่อให้ผู้ใช้งานทำงานได้ง่ายขึ้น และเพิ่มความถูกต้องในการจับคู่ดังรูปที่ 2.16

วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยเส้นมีข้อดี คือ ภาพทั้งสองไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างที่คล้ายกัน แต่ข้อจำกัดของวิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยเส้น คือ จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน เนื่องจากจากทุกจุดภาพจะต้องนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับเส้นที่ถูกกำหนดเป็นคุณลักษณะทุกเส้น ยิ่งจำนวนเส้นที่กำหนดมากขึ้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากขึ้นตามไปด้วย



(ก) การจับคู่ของจุดในวิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยการใช้เส้น

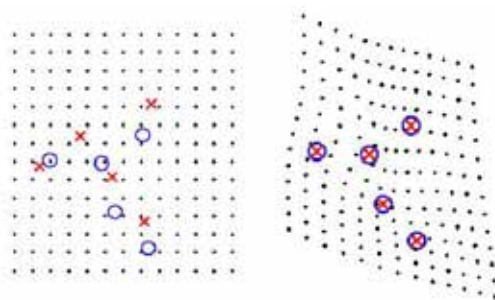


(ข) ตัวอย่างการบิดเบือนภาพโดยใช้วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยการใช้เส้น [15]

รูปที่ 2.16 ตัวอย่างวิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยการใช้เส้น

2.2.1.3 วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยจุด

วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยใช้จุดจะให้ผู้ใช้กำหนดคุณลักษณะที่สำคัญ หรือจุดเด่นของภาพ และจับคู่คุณลักษณะเหล่านั้นโดยการใช้จุด ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของรูปภาพจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการคำนวณจุดที่เหลือในภาพดังในตัวอย่างในรูปที่ 2.17 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ เช่น เรเดียล เบสิก ฟังก์ชัน (Radial Basic Functions) ในงานวิจัยของอาห์รัด ดิน (Arad Dyn) [16] ในปี 1994 ได้นำเสนอวิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยทำการคำนวณจากจุด ความเหมือนจริงจะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดที่ใช้ในการคำนวณ ในบางงานอาจจะใช้จุดไม่กี่จุดก็เพียงพอ แต่ในบางกรณีอาจจะต้องกำหนดจุดจำนวนมากจึงจะมีผลลัพธ์ที่มีความสมจริง เช่น ภาพที่มีรายละเอียดของภาพจำนวนมาก



รูปที่ 2.17 วิธีการกำหนดคุณลักษณะโดยการใช้จุด

2.2.2 วิธีการหลอมภาพโดยใช้อัลกอริทึมในการกำหนดและจับคู่คุณลักษณะ

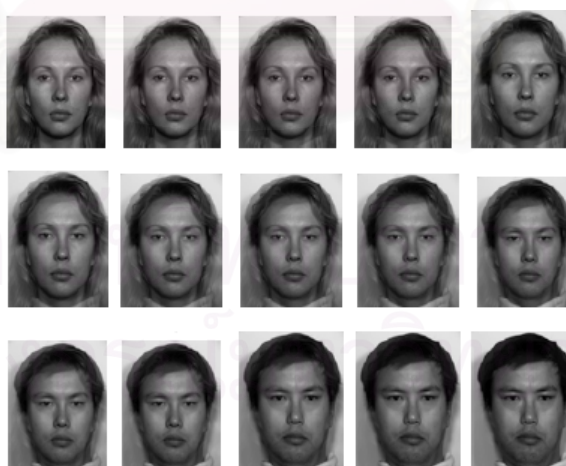
งานวิจัยในกลุ่มนี้เป็นงานวิจัยที่ทำการคำนวณหาจุดหรือคุณลักษณะและจับคู่แบบอัตโนมัติ โดยจะคำนวณหาจุด และจับคู่คุณลักษณะแบบอัตโนมัติโดยที่ผู้ใช้ไม่ต้องกำหนดเอง งานวิจัยในกลุ่มนี้ได้แก่ เอฟดีเอ็นเอ็น และซีพีเอฟ

2.2.2.1 วิธีการหลอมภาพโดยใช้เอฟดีเอ็นเอ็น (FDNN)

วิธีการหลอมภาพโดยใช้เอฟดีเอ็นเอ็น (FDNN: face detection neural network) พัฒนาโดยคารังการุ ฟูกุมิและอากามัทสึ (Karungaru, Minoru and Akamatsu) [17] วิธีนี้จะทำการหาและกำหนดจุดสำคัญของภาพ 5 จุด ได้แก่ บริเวณดวงตา 2 จุด บริเวณมุมปาก 2 จุด และจมูก เอฟดีเอ็นเอ็นจะอาศัยวิธีการของระบบโครงข่ายประสาท (Neural Network) ในการวิเคราะห์รูปพร้อมกับการใช้ตัวกรองเกาส์เซียนหาขอบของภาพ เมื่อได้จุดมาแล้วจะใช้วิธีการตารางเมชแบบสามเหลี่ยมในการหลอมภาพดังในรูปที่ 2.18 รูปที่ 2.19 แสดงผลลัพธ์การหลอมภาพโดยวิธีการเอฟดีเอ็นเอ็น



รูปที่ 2.18 วิธีการกำหนดจุดโดยวิธีเอฟดีเอ็นเอ็น [17]

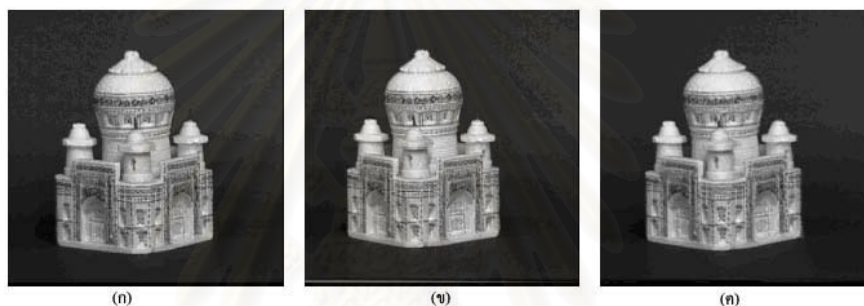


รูปที่ 2.19 ตัวอย่างผลลัพธ์วิธีการกำหนดจุดโดยวิธีเอฟดีเอ็นเอ็น [17]

ข้อจำกัดของวิธีการหลอมภาพโดยใช้เอฟดีเอ็นเอ็น คือ สามารถใช้ได้เฉพาะภาพใบหน้าคนเท่านั้น เนื่องจากการกำหนดจุดคุณลักษณะของภาพน้อยเกินไป จึงเกิดปัญหาการซ้อนกันของภาพขึ้น โดยเฉพาะบริเวณผม

2.2.2.2 วิธีการหาลอมภาพโดยตัวกรองจุดวิกฤต

ตัวกรองจุดวิกฤตได้ถูกนำเสนอในงานที่ชื่อว่า การจับคู่ภาพอัตโนมัติไร้เงื่อนไข บังคับโดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตแบบหลายความละเอียด (Unconstrained Automatic Image Matching Using Multiresolutional Critical-Point Filter) โดยชินากาวะและคูนอิ [10, 11] ในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้เฉพาะภาพแบบสีเทาเท่านั้น เนื่องจากค่าพลังงานที่ใช้ในการจับคู่จะใช้เพียงสองค่า คือ ความเข้มของสี และความสอดคล้องของตำแหน่ง ตัวอย่างของงานวิจัยแสดงในรูปที่ 2.20 นอกจากนี้ยังมีปัญหาการซ้อนทับบริเวณขอบภาพ (Occlusion on the boundary of image) เมื่อกรณีวัตถุที่อยู่บริเวณขอบของภาพปลายทางไม่มีอยู่ในภาพต้นฉบับ ดังนั้นในการจับคู่ก็จะไม่สามารถหาตำแหน่งที่เหมาะสมภาพปลายทางได้ ซึ่งพอทำการประมาณค่าจะทำให้รูปบริเวณขอบนั้นหายไปดังในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการหาลอมภาพโดยซีพีเอฟ (ก) ภาพที่มองจากทางด้านซ้าย (ข) ภาพที่มองจากทางด้านขวา (ค) ภาพที่ได้จากการประมาณค่าของภาพทั้งสองที่ผ่านการจับคู่แล้ว [10]



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการหาลอมภาพโดยซีพีเอฟ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพปลายทาง (ค) ภาพที่ได้จากการประมาณค่าในช่วง [10]

ต่อมาได้ถูกพัฒนาโดยชินากาวะ และ ฮามูกะ เป็นการประมาณภาพในช่วงโดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตแบบหลายความละเอียดที่เพิ่มสมรรถนะ (Image Interpolation Using Enhanced Multiresolution Critical-Point Filter) โดยเปลี่ยนไปใช้ระบบปริภูมิสีแบบสีสั้น ความเข้มตัวของสี และความเข้มของแสง หรือ เอชเอสไอ เพื่อให้สามารถใช้กับภาพที่มีสีได้ ตัวอย่างของงานวิจัยแสดงในรูปที่ 2.22 นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้แนะนำวิธีการจับคู่แบบผกผัน (Inverse Mapping) เพื่อแก้ปัญหาการ

ซ้อนทับบริเวณขอบภาพ แต่งานวิจัยนี้ยังใช้การพิจารณาเป็นจุดภาพในการจับคู่ทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการคำนวณ



รูปที่ 2.22 การใช้ซีพีเอฟในวิดีโอ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพปลายทาง (ค) ภาพที่ทำการสร้างขึ้นมา [11]

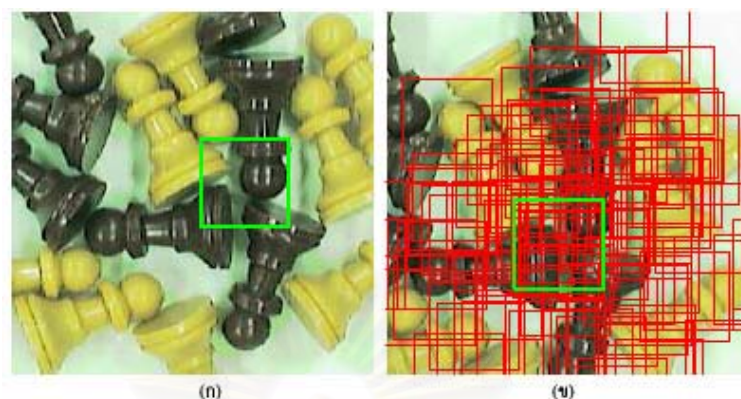
นอกจากด้านการหลอมภาพแล้วตัวกรองจุดวิกฤตยังได้นำไปพัฒนาในงานติดตามวัตถุ ได้แก่ งานวิจัยการติดตามวัตถุแบบทันกาลด้วยตัวกรองจุดวิกฤตแบบหลายความละเอียด (Real Time Object Tracking using Multi-Res. Critical Point Filters) โดยคูแรนด์ (J.Curand) [18] เป็นงานวิจัยที่ได้นำเอาตัวกรองแบบจุดวิกฤตมาใช้ในการตรวจจับวัตถุแบบเวลาจริง โดยจะทำนายตัวแปร ได้แก่ จุดศูนย์กลางของวัตถุ พื้นผิวของวัตถุ และการเคลื่อนไหวที่จับได้ การกำหนดวัตถุที่จะตรวจจับจะอาศัยวิธีการวาดเส้นเส้นรอบขอบหรือคอนทัวร์รอบวัตถุที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้กับวัตถุที่มีการย้ายตำแหน่ง มีการหมุน หรือมีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้ ตัวอย่างของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การตรวจจับวัตถุที่กลิ้งมีการหมุน [18]

และยังมีงานวิจัยการจับคู่ในภาพโดยใช้หน้าต่างด้วยตัวกรองจุดวิกฤต (Point and Window Based Matching in Images using Critical Point Filter) โดย แบรดเลย์ เจมส์ แชมเบอร์ส (Bradley James Chambers) [19, 20, 21] งานวิจัยนำเสนอวิธีการปรับปรุง โดยทำการพิจารณาเป็นบริเวณเล็กๆของรูปภาพ หรือหน้าต่างในการจับคู่โดยจะใช้อัลกอริทึมการควบแน่น (Condensation) ในการวนซ้ำเพื่อหาหน้าต่างที่เหมาะสมที่สุดจากภาพต้นฉบับ แต่งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของหน้าต่างในการจับคู่ ถ้าหน้าต่างมีขนาดเล็กเกินไปในการจับคู่อาจมีความผิดพลาดในกรณีที่มีภาพที่

ความคล้ายกับหน้าต่างที่กำหนด ถ้าหน้าต่างมีขนาดใหญ่เกินไปต้องเสียเวลาในการคำนวณมาก ตัวอย่างของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 (ก) หน้าต่างของภาพต้นฉบับ (ข) หน้าต่างที่จับคู่ได้ในภาพปลายทาง [21]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

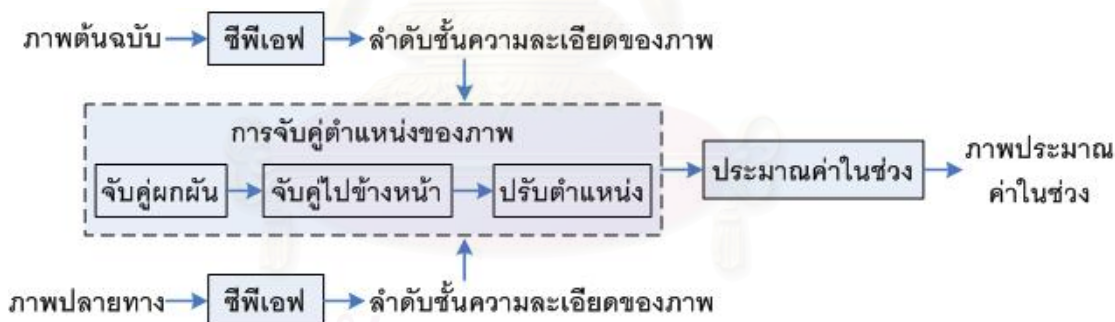
บทที่ 3

การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตและเซตระดับ

เนื้อหาในบทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะอธิบายขั้นตอนวิธีการจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตจากงานวิจัยเดิม [10, 11] และส่วนที่สองจะอธิบายวิธีที่นำเสนอคือ การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตรวมกับการใช้วิธีการเซตระดับ

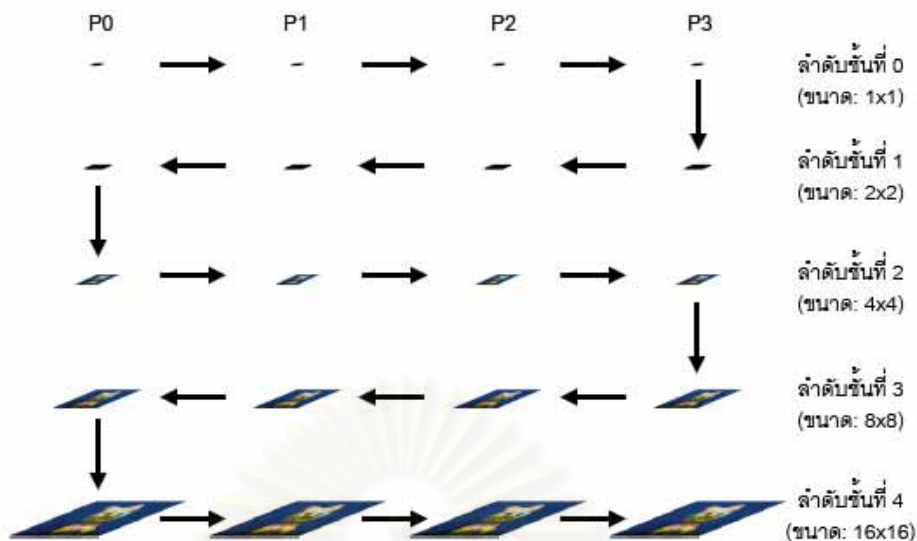
3.1 การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤต

ตัวกรองจุดวิกฤตจะทำการจับคู่ทุกจุดภาพในภาพต้นฉบับกับภาพปลายทาง โดยขั้นตอนการจับคู่จุดของภาพจะทำการจับคู่แบบผกผัน (Inverse mapping) คือ การจับคู่จากภาพปลายทางไปยังภาพต้นฉบับ ขั้นตอนต่อมาจะทำการจับคู่แบบไปข้างหน้า (Forward mapping) คือ การจับคู่จากภาพต้นฉบับไปยังภาพปลายทาง ขั้นตอนถัดไปจะทำการปรับตำแหน่งจุดภาพที่ได้จากการจับคู่แบบไปข้างหน้าด้วยการนำจุดภาพที่ได้จากการจับคู่แบบผกผันมาร่วมพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 การจับคู่จะเริ่มต้นจากลำดับชั้นที่มีความละเอียดต่ำที่สุดไปจนถึงลำดับชั้นที่มีความละเอียดสูงที่สุด หรือจากระดับชั้นบนสุดของพีระมิดภาพไปยังระดับชั้นล่างสุดของพีระมิดภาพ และในแต่ละลำดับชั้นก็จะทำการจับคู่แต่ละภาพย่อย ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาลอมภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤต

เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการจับคู่ ดังนั้นจะมีการสลับลำดับการจับคู่ของภาพย่อยดังในรูปที่ 3.2 แสดงลำดับในการจับคู่ในแต่ละลำดับชั้น โดยในลำดับชั้นที่เป็นเลขคู่จะเริ่มจากภาพย่อย $P_0 > P_1 > P_2 > P_3$ และในทางกลับกันลำดับชั้นที่เป็นเลขคี่จะเริ่มจากภาพย่อย $P_3 > P_2 > P_1 > P_0$ ตามลำดับ ในแต่ละภาพย่อยจะเริ่มทำการพิจารณาจับคู่ที่ละจุดภาพ เริ่มจากจุดภาพที่มีความเข้มสีของขอบมากที่สุดไปหาจุดที่มีความเข้มสีของขอบน้อยที่สุด ค่าความเข้มสีของขอบหาได้จากสมการ (2.16) และสมการ (2.17) โดยขั้นตอนการจับคู่จุดภาพในแต่ละภาพย่อยประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.2 ลำดับการจับคู่ของภาพย่อยในแต่ละลำดับชั้นของความละเอียดของภาพ



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจับคู่จุดภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤต
ในแต่ละลำดับชั้นของความละเอียด

ขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันและการจับคู่ไปข้างหน้าของภาพในแต่ละลำดับชั้น จะมีขั้นตอนในการจับคู่ที่เหมือนกันดังรูปที่ 3.3 โดยขั้นตอนแรกจะทำการหาขอบเขตที่เป็นไปได้ในภาพปลายทางที่จะจับคู่กับจุดในภาพต้นฉบับ ขั้นตอนที่สองจะทำการคำนวณค่าพลังงานระหว่างจุดในภาพต้นฉบับกับจุดในภาพปลายทางที่อยู่ในขอบเขตที่เป็นไปได้ที่จะจับคู่ ขั้นตอนที่สามจะทำการตรวจสอบจุดที่จะจับคู่ให้เป็นไปตามเงื่อนไขแบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึง ขั้นตอนที่จะทำการหาจุดในขอบเขตที่มีค่าพลังงานต่ำที่สุด ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการจับคู่จุดในภาพต้นฉบับกับจุดที่มีค่าพลังงานต่ำที่สุด

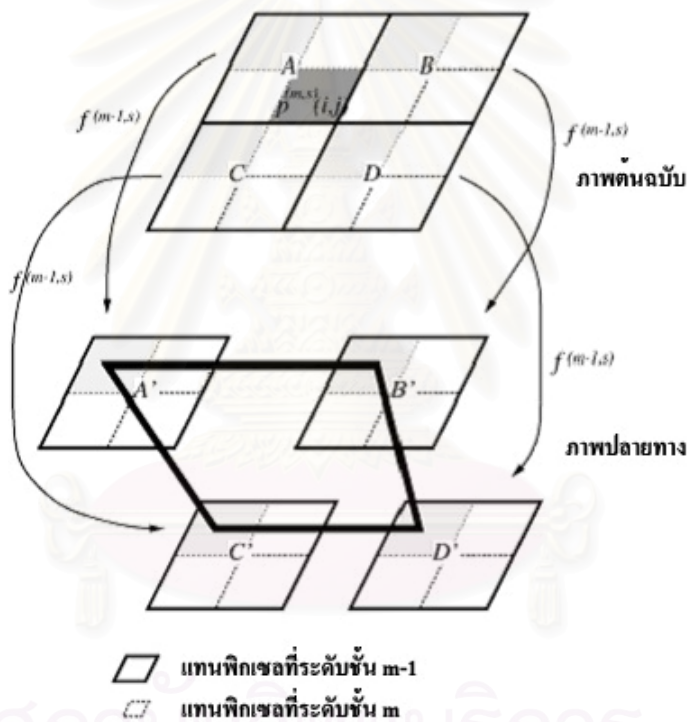
3.1.1 การพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่

ขั้นตอนนี้เป็นการหาขอบเขตบริเวณของภาพปลายทางที่เป็นไปได้ ที่จะพิจารณาจับคู่กับภาพต้นฉบับ โดยสมมติให้ $p_{(i,j)}^{(m,s)}$ เป็นจุดภาพของภาพต้นฉบับที่สอดคล้องกับ $q_{(k,l)}^{(m,s)}$ ในภาพปลายทาง ดังนั้น $f^{(m,s)}(i, j) = (k, l)$ หรือตำแหน่ง (i, j) ของภาพต้นฉบับถูกจับคู่กับตำแหน่ง (k, l) ของภาพปลายทาง โดย $q_{(k,l)}^{(m,s)}$ ควรจะอยู่ในขอบเขตดังสมการที่ (3.1)

$$q_{g^{(m,s)}(i-1, j-1)}^{(m,s)} q_{g^{(m,s)}(i-1, j+1)}^{(m,s)} q_{g^{(m,s)}(i+1, j+1)}^{(m,s)} q_{g^{(m,s)}(i+1, j-1)}^{(m,s)} \tag{3.1}$$

โดยที่ $g^{(m,s)}(i, j) = f^{(m-1,s)}(\text{parent}(i, j)) + f^{(m-1,s)}(\text{parent}(i, j) + (1,1))$ (3.2)

$$\text{parent}(i, j) = \left(\left\lfloor \frac{i}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{j}{2} \right\rfloor \right) \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.4 ขอบเขตในการจับคู่ของจุดภาพ $p_{(i,j)}^{(m,s)}$

รูปที่ 3.4 แสดงบริเวณขอบเขตในการจับคู่ โดยสมมติให้ลำดับชั้นที่ $m-1$ จุดภาพ A, B, C และ D ในภาพต้นฉบับจับคู่กับจุดภาพ A', B', C' และ D' ในภาพปลายทาง ดังนั้นเมื่อวาดเส้นเชื่อมทั้ง 4 จุดภาพ จะได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Inherited quadrilateral) ซึ่งเป็นบริเวณขอบเขตของภาพปลายทาง โดยที่จุดภาพ $p_{(i,j)}^{(m,s)}$ จะใช้พิจารณาคำนวณหาค่าพลังงานเพื่อนำไปเปรียบเทียบหาคำแหน่งที่เหมาะสมในการจับคู่หรือหา $q_{(k,l)}^{(m,s)}$

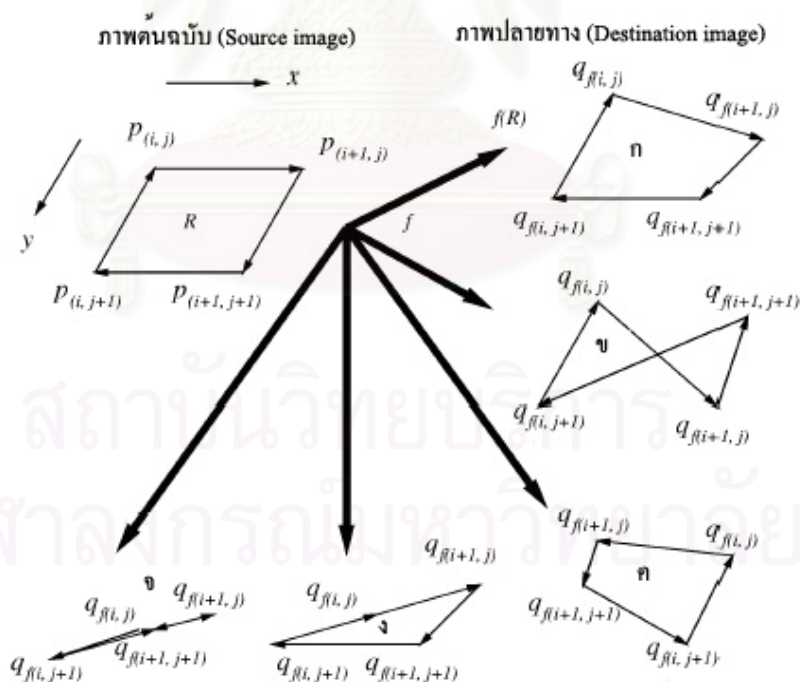
3.1.2 การหาค่าพลังงาน

ขั้นตอนนี้จะคำนวณหาค่าพลังงาน ระหว่างจุดที่ต้องการจะจับคู่ในภาพต้นฉบับ กับจุดในขอบเขตบริเวณที่เป็นไปได้จากขั้นตอนที่หนึ่งของภาพปลายทาง โดยจะทำการหาจุดที่มีค่าพลังงานต่ำที่สุด สมการที่ใช้ในคำนวณเป็นไปตามสมการที่ 2.2.17 (รายละเอียดในบทที่ 2)

3.1.3 การพิจารณาเงื่อนไขแบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึง (Bijectivity Conditions)

นอกจากการพิจารณาค่าพลังงานแล้ว เพื่อให้มีความถูกต้องในการจับคู่จุดภาพ ดังนั้นจะต้องมีการพิจารณาเงื่อนไขแบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึง เริ่มจากการพิจารณาจุดภาพ $p_{(i,j)}^{(m,s)}$, $p_{(i+1,j)}^{(m,s)}$, $p_{(i,j+1)}^{(m,s)}$, $p_{(i+1,j+1)}^{(m,s)}$ ของภาพต้นฉบับและกำหนดให้ R เป็นลำดับของเวกเตอร์จุดภาพในภาพต้นฉบับ $\overrightarrow{p_{(i,j)}^{(m,s)} p_{(i+1,j)}^{(m,s)}}$, $\overrightarrow{p_{(i+1,j)}^{(m,s)} p_{(i+1,j+1)}^{(m,s)}}$, $\overrightarrow{p_{(i,j+1)}^{(m,s)} p_{(i+1,j+1)}^{(m,s)}}$ และ $\overrightarrow{p_{(i,j+1)}^{(m,s)} p_{(i,j)}^{(m,s)}}$ จะถูกจับคู่จุดไปยัง $q_{(i,j)}^{(m,s)}$, $q_{(i+1,j)}^{(m,s)}$, $q_{(i,j+1)}^{(m,s)}$, $q_{(i+1,j+1)}^{(m,s)}$ ของภาพปลายทางโดยมีทิศทางแทนด้วย R' ซึ่งจะเป็นไปตามเงื่อนไข แบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึงดังนี้ (ดังในรูปที่ 3.5)

1. เวกเตอร์จะต้องไม่ตัดกัน
2. ทิศทางของเส้นขอบของ R ในภาพต้นฉบับ และ R' ในภาพปลายทาง ควรจะไปในทิศทางเดียวกัน
3. พื้นที่เกิดจากลำดับเวกเตอร์ใน R' ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์



รูปที่ 3.5 เงื่อนไขแบบหนึ่งต่อหนึ่งทั่วถึง

รูปที่ 3.5 (ก) และรูปที่ 3.5 (ง) จะเป็นรูปที่ถูกต้องเป็นไปตามกฎของแบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึง ส่วนรูปที่ 3.5 (ข) จะผิดกฎข้อที่ 1 เนื่องจากจะมีการตัดกันของเวกเตอร์ ส่วนในรูป

ที่ 3.5 (ค) จะผิดกฎข้อที่ 2 เนื่องจากในภาพต้นฉบับจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา แต่ภาพปลายทางจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนในรูปที่ 3.5 (จ) จะผิดกฎข้อที่ 3 เนื่องจากพื้นที่มีค่าเท่ากับศูนย์

3.1.4 การปรับตำแหน่ง

เมื่อทำการจับคู่แบบผกผันและการจับคู่แบบไปข้างหน้าเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป จะทำการปรับตำแหน่งที่จับคู่ให้เหมาะสม โดยในการปรับตำแหน่งจะทำการคำนวณหาค่าพลังงาน ซึ่งเป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างการจับคู่แบบไปข้างหน้ากับการจับคู่แบบผกผัน

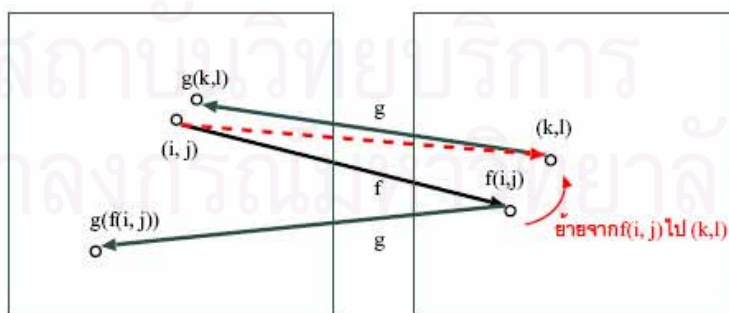
การจับคู่แบบไปข้างหน้าเป็นการคำนวณจับคู่จากภาพต้นฉบับ p ไปยังภาพปลายทาง q สามารถเขียนได้เป็น $f: p \rightarrow q$ ส่วนการคำนวณแบบผกผันเป็นการคำนวณจับคู่จากภาพปลายทาง q ไปยังภาพต้นฉบับ p สามารถเขียนได้เป็น $g: q \rightarrow p$ ดังนั้นถ้า f จับคู่ได้อย่างเหมาะสมแล้วจะได้ว่า f ควรจะใกล้เคียงกับ g^{-1} จากสมมุติฐานนี้ในการจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตขั้นแรกจะทำการจับคู่แบบย้อนกลับก่อน หลังจากนั้นจะทำการจับคู่แบบไปข้างหน้า และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการปรับตำแหน่งจุดภาพที่ได้จากการจับคู่แบบไปข้างหน้าด้วยการนำจุดภาพที่ได้จากการจับคู่แบบผกผันมาร่วมพิจารณา ดังสมการที่ (3.4)

$$D_{(i,j)}^{(m,s)} = D_{M0(i,j)}^{(m,s)} + D_{M1(i,j)}^{(m,s)} \tag{3.4}$$

โดยที่
$$D_{M0(i,j)}^{(m,s)} = \sum_{i=0}^{2^m-1} \sum_{j=0}^{2^m-1} \|(i,j) - g(f^{-1}(i,j))\|^2 \tag{3.5}$$

และ
$$D_{M1(i,j)}^{(m,s)} = \sum_{i=0}^{2^m-1} \sum_{j=0}^{2^m-1} \|f(i,j) - f^{-1}(i,j)\|^2 \tag{3.6}$$

$f^{-1}: p \rightarrow q$ เป็นการจับคู่หลังจากการปรับตำแหน่ง และ $f: p \rightarrow q$ เป็นการจับคู่ก่อนการปรับตำแหน่งดังในรูปที่ 3.6 แสดงภาพตัวอย่างการปรับตำแหน่งโดยอาศัยการคำนวณแบบย้อนกลับ

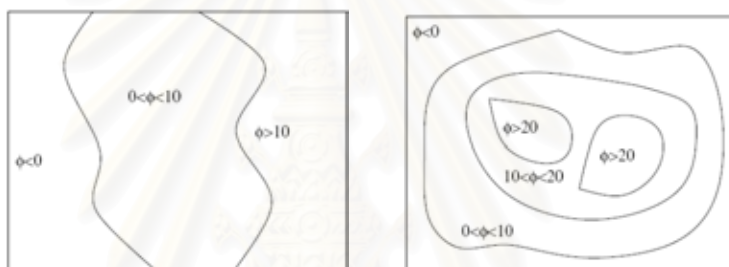


รูปที่ 3.6 ภาพตัวอย่างการปรับตำแหน่ง

3.2 การจับคู่โดยใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ

การใช้ตัวกรองจุดวิกฤตในการคำนวณจะเห็นได้ว่าการคำนวณซ้ำซ้อน โดยในการพิจารณาขอบเขตในการจับคู่ตำแหน่งของแต่ละจุดบนภาพในแต่ละลำดับชั้น ขอบเขตที่ใช้ในการพิจารณาส่วนใหญ่จะมีบริเวณขอบเขตที่กว้างทำให้มีความซ้ำซ้อนของข้อมูล และยังเสียเวลาในการคำนวณจับคู่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดปัญหาในการจับคู่ที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจากปัญหานี้จึงได้นำเอาหลักการของเซตระดับเข้ามาใช้เพื่อที่จะลดขอบเขตในการคำนวณลง โดยให้พิจารณาเฉพาะจุดในขอบเขตที่อยู่ในเซตเดียวกัน

การคำนวณแบ่งเซตระดับในที่นี้จะพิจารณาข้อมูลสีของภาพ โดยทำการแบ่งจากรูปภาพสีเป็นรูปภาพแบบเทาและอาศัยค่าขีดแบ่ง(Threshold) ในการแบ่งข้อมูลระดับสี ดังในรูปที่ 3.7 เป็นรูปแสดงตัวอย่างข้อมูลของภาพที่ถูกแบ่งอยู่ในเซตระดับเดียวกัน [22]



รูปที่ 3.7 การแบ่งเซตระดับ

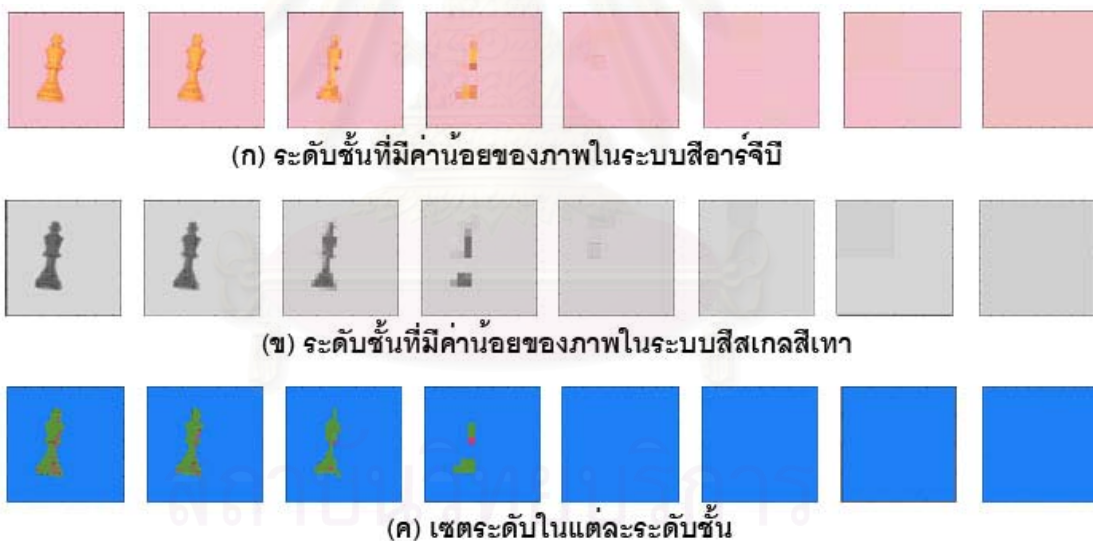
3.2.1 การคำนวณหาเซตระดับของภาพ

การคำนวณหาเซตระดับของภาพจะเริ่มต้นคำนวณหาที่ลำดับชั้นที่มีความละเอียดต่ำที่สุด และพิจารณาในแต่ละลำดับชั้นไปจนถึงลำดับชั้นที่มีความละเอียดสูงที่สุด โดยลำดับชั้นนี้ได้มาจากการกรองโดยตัวกรองจุดวิกฤต ขั้นตอนในการคำนวณหาเซตระดับมีขั้นตอนเริ่มต้นจากการกำหนดเซตระดับแรกให้กับลำดับชั้นที่มีความละเอียดต่ำที่สุด และให้ค่าเซตระดับแรกมีค่าเท่ากับค่าระดับสีเทา $p_{(1,1)}$ ในลำดับชั้นถัดไปจะคำนวณเปรียบเทียบค่าระดับสีเทาระหว่างจุดภาพ $p_{(i,j)}$ และจุดภาพที่เป็นพ่อแม่ของ $p_{(i,j)}$ ถ้าค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่า ϕ จะกำหนดให้จุดภาพ $p_{(i,j)}$ ในอยู่เลเวลเดียวกันกับจุดภาพที่เป็นพ่อแม่ของ $p_{(i,j)}$ แต่ถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า ϕ จะทำการเปรียบเทียบกับค่าเซตระดับอื่นๆที่มีอยู่ ถ้าค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกับเลเวลอื่นน้อยกว่าค่า ϕ จะกำหนดให้ จุดภาพ $p_{(i,j)}$ อยู่ในเซตระดับนั้น แต่ถ้ามากกว่าจะทำการกำหนดเซตระดับใหม่ให้กับจุดภาพนั้น เขียนเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

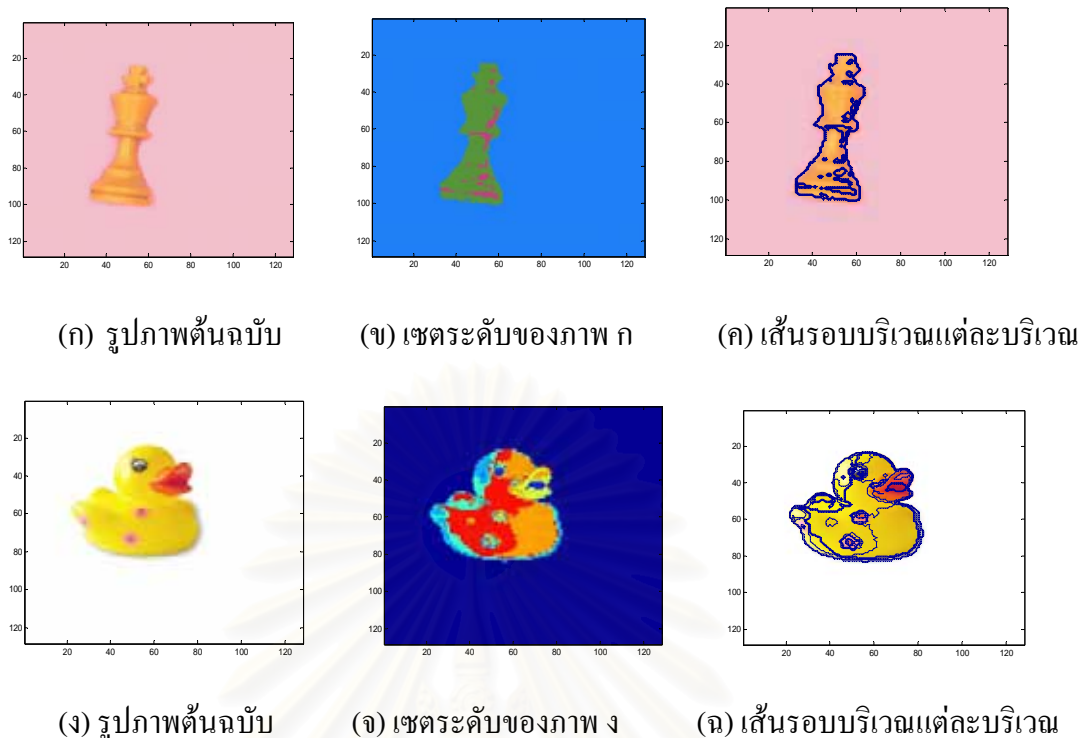
ขั้นตอนในการหาเซตระดับของภาพ

1. กำหนดให้ $levelSet_{(1,1)}^{(1,s)} = 1, l = 1$ และ $level(1) = p_{(1,1)}^{1,s}$
2. คำนวณตามสมการ $|p_{parent(i,j)}^{(m-1,s)} - p_{(i,j)}^{(m,s)}| \leq \phi$
 - ถ้ามีค่าน้อยกว่า ϕ จะกำหนดให้ $levelSet_{(i,j)}^{(m,s)} = levelSet_{(parent(i,j))}^{(m-1,s)}$
 - ถ้ามีค่ามากกว่า ϕ จะทำการคำนวณเปรียบเทียบค่ากับเซตระดับอื่นตามสมการ $|p_{(i,j)}^{(m,s)} - level(k)| \leq \phi$ โดยที่ $k = (1, 2, \dots, l)$
 - ถ้ามีค่าน้อยกว่า ϕ จะกำหนดให้ $levelSet_{(i,j)}^{(m,s)} = k$
 - ถ้ามีค่ามากกว่า ϕ จะให้ $l = l + 1, levelSet_{(i,j)}^{(m,s)} = l$ และ $level(l) = p_{(i,j)}^{m,s}$
3. คำนวณซ้ำข้อที่ 2 ในแต่ละจุดของภาพ (i, j) โดย $i = 1, 2, \dots, 2^m$ และ $j = 1, 2, \dots, 2^m$
4. คำนวณซ้ำข้อที่ 3 ในแต่ละลำดับชั้นของความละเอียด m โดยที่ $m = 1, 2, \dots, n$

รูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 เป็นรูปแสดงตัวอย่างของการหาเซตระดับ โดยรูปที่ 3.8 จะแสดงภาพในแต่ละลำดับชั้นและเซตระดับในชั้นนั้น โดยบริเวณที่มีสีเดียวกันจะอยู่ในเซตระดับเดียวกัน และรูปที่ 3.9 เป็นตัวอย่าง 2 ตัวอย่างที่แสดงเส้นรอบบบริเวณที่สร้างมาจากเซตระดับ ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า ϕ เท่ากับ 30



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการหาเซตระดับของภาพในแต่ละลำดับชั้น

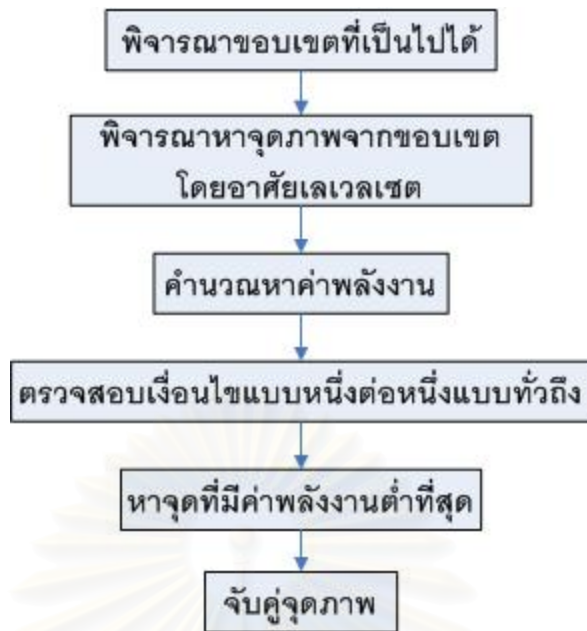


รูปที่ 3.9 ตัวอย่างเซตระดับของภาพและเส้นรอบบริเวณที่สร้างจากเซตระดับ

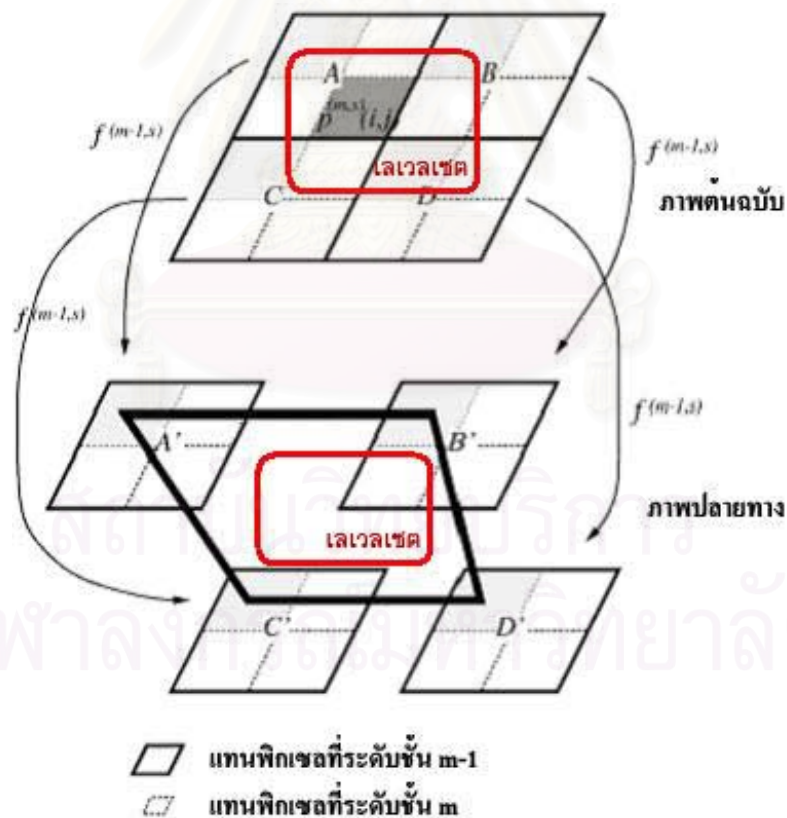
3.2.2 การนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต

การนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตจะนำมาใช้ต่อจากขั้นตอนพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่ดังในรูปที่ 3.10 โดยในการหาจุดภาพปลายทางที่จะพิจารณาจับคู่กับจุดภาพ $p_{(i,j)}$ ในภาพต้นฉบับสามารถทำการคำนวณดังสมการที่ 3.1 ร่วมกับการพิจารณาเซตระดับของจุดภาพในขอบเขตที่หาได้นั้นว่าอยู่ในเซตระดับเดียวกับ $p_{(i,j)}$ หรือเซตระดับที่มีค่าใกล้เคียงกับเซตระดับ $p_{(i,j)}$ ซึ่งเซตระดับที่ใกล้เคียงกันจะพิจารณาจากค่าของเซตระดับไม่ต่างกันเกินค่า ϕ ตัวอย่างรูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างการพิจารณาของเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่โดยในกรอบสีแดงเป็นบริเวณที่มีค่าเซตระดับเดียวกัน โดยการนำเซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตจะทำให้ลดจำนวนจุดที่จะนำมาใช้ในการพิจารณา

กรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst case) ในการนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต คือ ภาพทั้งภาพนั้นมีสีเดียวกันทั้งหมด เนื่องจากเมื่อนำภาพไปแบ่งเซตระดับจะแบ่งได้แค่เซตเดียว ทำให้จำนวนจุดที่ใช้ในการพิจารณาเท่าเดิม เพราะทุกจุดภาพในขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่ยังต้องนำมาทำการคำนวณเช่นเดิม แต่โดยปกติแล้วภาพทั่วไปไม่ได้มีสีเดียวกันทั้งภาพ แต่จะมีองค์ประกอบของสีหลากหลาย จึงทำให้การนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตสามารถลดจำนวนจุดที่ใช้ในการคำนวณได้ ดังผลการทดลองในบทที่ 4



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจับคู่จุดภาพด้วยตัวกรองจุดวิกฤต
ร่วมกับเซตระดับในแต่ละลำดับชั้นของความละเอียด



รูปที่ 3.11 การใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการพิจารณาขอบเขต
ที่เป็นไปได้ในการจับคู่

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อจะทดสอบการนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตว่าสามารถที่จะลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเซตระดับสามารถที่จะช่วยลดจำนวนจุดภาพที่ใช้ในการคำนวณ โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้ของการจับคู่ที่ได้ และภาพที่ระหว่างกลางที่ได้ใกล้เคียงกับการที่ใช้ตัวกรองจุดวิกฤตเพียงวิธีเดียว การทดลองจะทำการเปรียบเทียบการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเปรียบเทียบการจับคู่ของจุดภาพ และภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นของวิธีทั้งสอง การสร้างภาพระหว่างกลางจะใช้ การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation) ส่วนที่สองจะทำการเปรียบเทียบจำนวนจุดภาพที่ใช้ในการพิจารณาและเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนการจับคู่

ภาพที่นำมาใช้ในการทดสอบจะใช้ภาพ 2 แบบ แบบแรกเป็นการทดสอบกับภาพที่มีการแปลงสัมพรรค (Affine transformation) สามกรณี คือ กรณีการเลื่อนที่ (Translation) กรณีการหมุน (rotation) และกรณีการปรับมาตรา (Scaling) โดยภาพต้นฉบับเป็นภาพถ่ายทั่วไปที่มีวัตถุอยู่ในภาพเพียงวัตถุเดียวและสีพื้นฉากหลังมีสีเดียว ส่วนภาพปลายทางจะใช้โปรแกรมอโดบีโฟโต้ชอป (Adobe Photoshop) สร้างจากภาพต้นฉบับดังในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 แบบที่สองเป็นการทดสอบกับภาพทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.8 ภาพที่ใช้ในการทดลองจะมีขนาด 128*128

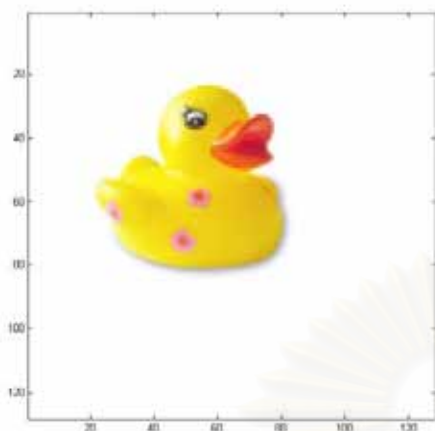
ในการวัดความถูกต้องของการจับคู่ระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับจะทดสอบสองกรณี ได้แก่ กรณีการเลื่อนที่ และกรณีการหมุนของภาพ โดยจะทำการประมาณตำแหน่งที่จับคู่ กรณีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของภาพสามารถประมาณตำแหน่งที่ถูกจับคู่ได้จากการบวกด้วยระยะที่เปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ (4.1) โดยที่ dx และ dy เป็นระยะที่เปลี่ยนแปลงในแกน x และแกน y ตามลำดับ ส่วนในกรณีการหมุนของภาพจะประมาณตำแหน่งดังสมการที่ (4.2) การหาค่าความผิดพลาดในการจับคู่จะใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean Error) ในการวัดค่าความผิดพลาดดังสมการที่ (4.3)

$$(x', y') = (x + dx, y + dy) \quad (4.1)$$

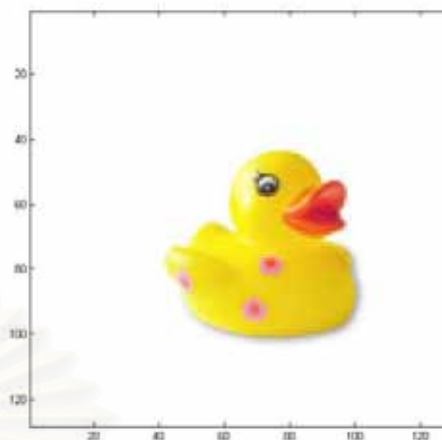
$$(x', y') = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} (x, y) \quad (4.2)$$

$$ME = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_{(i,j)} - y_{(i,j)}| \quad (4.3)$$

4.1 ภาพที่ใช้ในการทดลอง

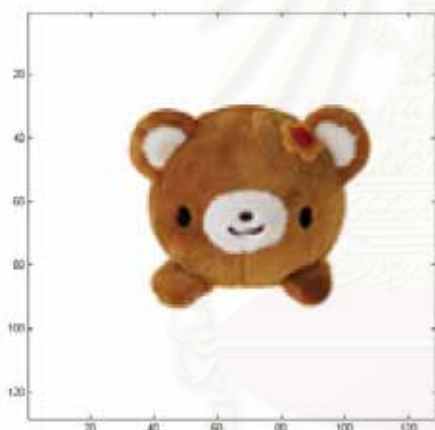


(ก) ภาพต้นฉบับ

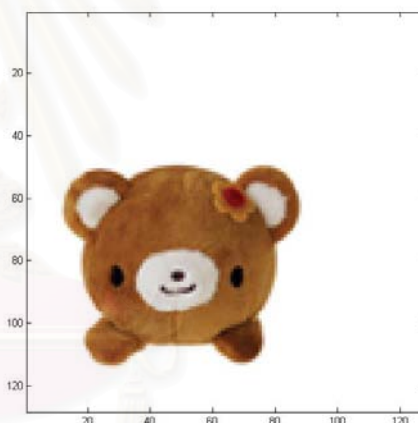


(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.1 แสดงภาพชุดที่ 1 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่



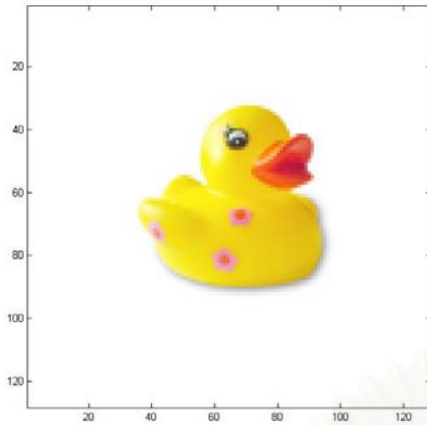
(ก) ภาพต้นฉบับ



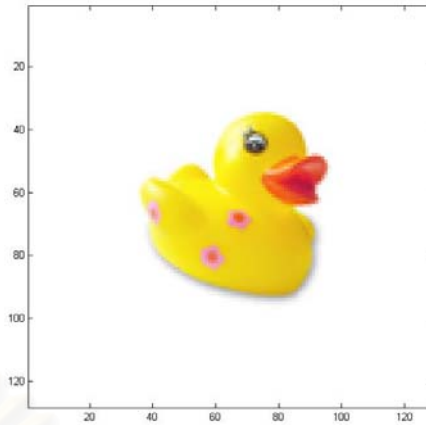
(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.2 แสดงภาพชุดที่ 2 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่

รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงภาพที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบผลของการจับคู่ และภาพระหว่างกลางระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในกรณีการเลื่อนของภาพ โดยรูปที่ 4.1 (ข) มีการเลื่อนที่จากรูปที่ 4.1 (ก) ในแกน x และแกน y เท่ากับ 20 จุดภาพ และในรูปที่ 4.2 (ข) มีการเลื่อนที่จากรูปที่ 4.2 (ก) ในแกน x เท่ากับ 20 จุดภาพ และแกน y เท่ากับ -20 จุดภาพ

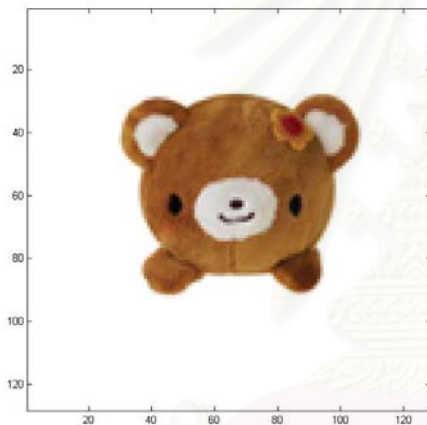


(ก) ภาพต้นฉบับ

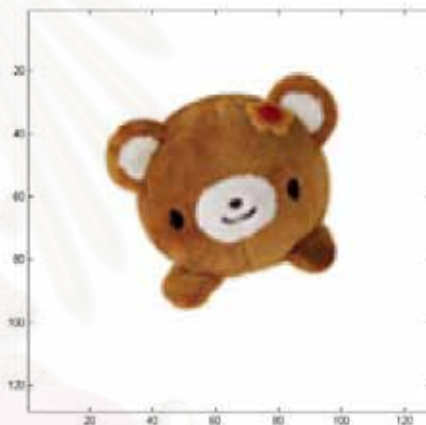


(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.3 แสดงภาพชุดที่ 3 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่



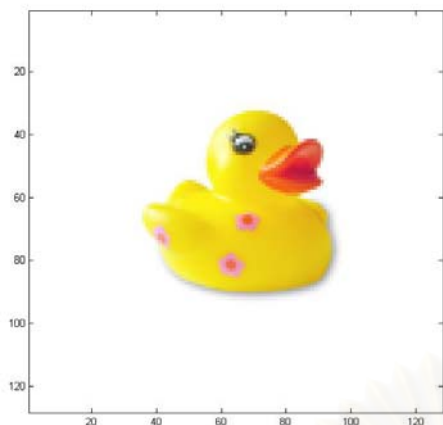
(ก) ภาพต้นฉบับ



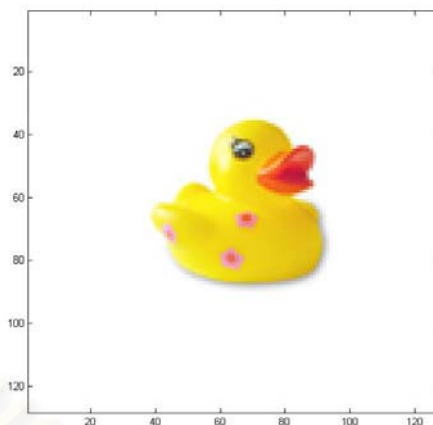
(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.4 แสดงภาพชุดที่ 4 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่

รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงภาพที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบผลของการจับคู่ และภาพระหว่างกลางระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในกรณีการหมุนของภาพโดยภาพที่ 4.3 (ข) หมุนจากภาพที่ 4.4 (ก) 15 องศา ส่วนภาพที่ 4.4 (ข) หมุนจากภาพที่ 4.5 (ก) -15 องศา



(ก) ภาพต้นฉบับ

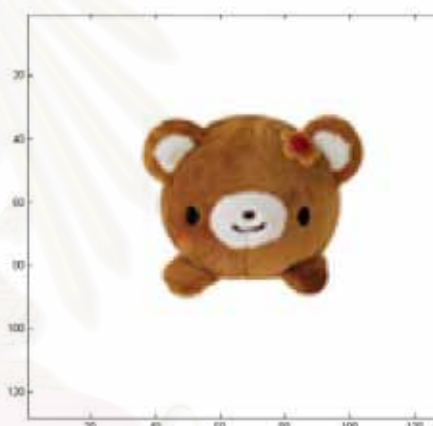


(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.5 แสดงภาพชุดที่ 5 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.6 แสดงภาพชุดที่ 6 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่

รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 แสดงภาพที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบผลของการจับคู่ และภาพระหว่างกลางระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในกรณีการปรับขนาดของวัตถุภายในภาพ โดยวัตถุในภาพปลายทางจะถูกย่อขนาดจากภาพต้นฉบับ 10 %

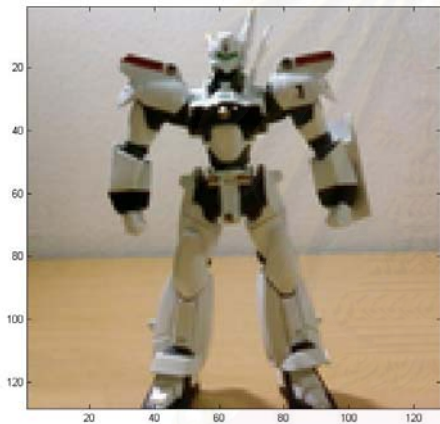


(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.7 แสดงภาพชุดที่ 7 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่



(ก) ภาพต้นฉบับ



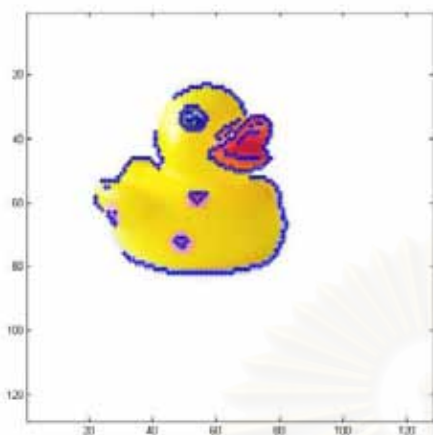
(ข) ภาพปลายทาง

รูปที่ 4.8 แสดงภาพชุดที่ 8 ที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบการจับคู่

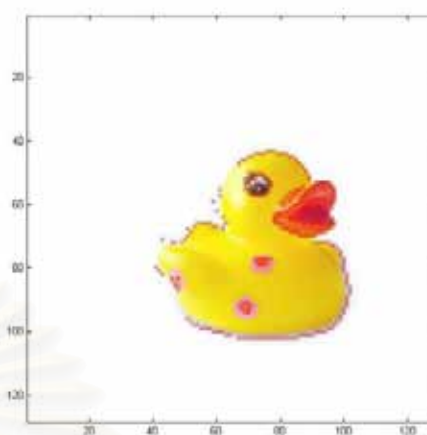
รูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 แสดงภาพที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบผลของการจับคู่ และภาพระหว่างกลางระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้ตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในกรณีภาพถ่ายของเสาที่แตกต่างกัน

4.2 ผลการทดลอง

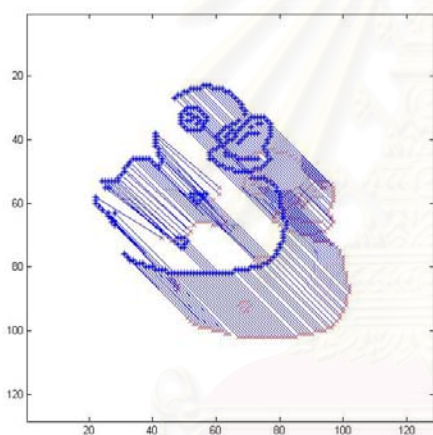
4.2.1 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 1



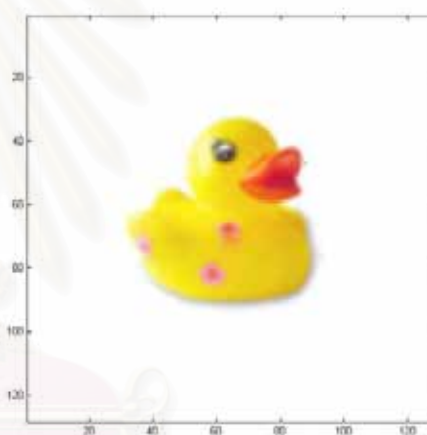
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



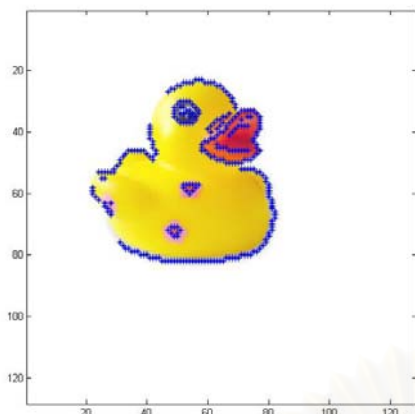
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



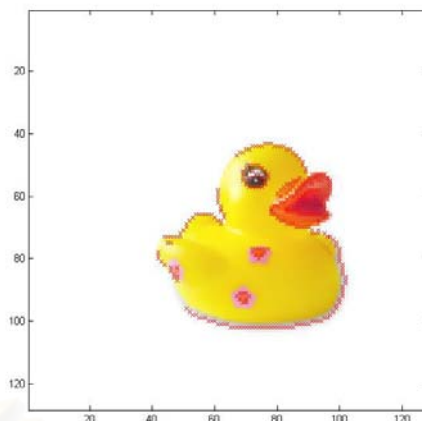
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.9 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 1

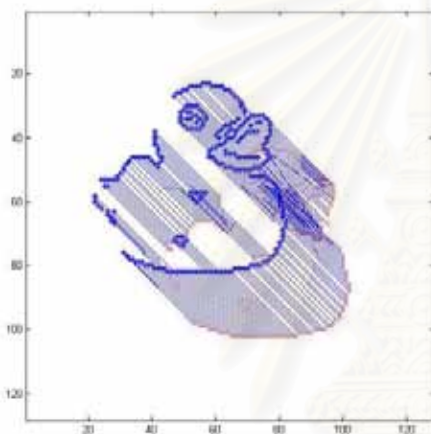
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 1 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.9 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.9 (ข) ส่วนรูปที่ 4.9 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.9 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



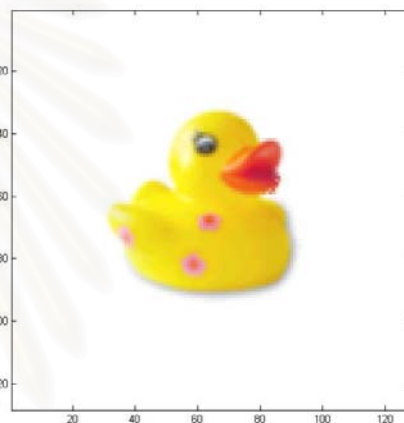
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.10 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 1

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 1 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.10 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางในรูปที่ 4.10 (ข) ส่วนรูปที่ 4.10 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.10 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 1

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.170043 | 107 | 0.172438 |
| 3 | 1899 | 0.439173 | 1169 | 0.286936 |
| 4 | 12160 | 2.678943 | 9964 | 2.292258 |
| 5 | 61581 | 13.5928 | 53055 | 12.049845 |
| 6 | 272374 | 60.08803 | 250793 | 56.695246 |
| 7 | 1218878 | 267.1545 | 1140751 | 258.1628 |

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 1

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.046153 | 98 | 0.037724 |
| 3 | 1828 | 0.422568 | 1293 | 0.309536 |
| 4 | 11472 | 2.566533 | 10076 | 2.305593 |
| 5 | 58474 | 12.94072 | 51989 | 11.8305 |
| 6 | 264488 | 58.29552 | 254345 | 57.200027 |
| 7 | 1252936 | 273.7898 | 1209340 | 271.828188 |

ตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคุณภาพของภาพชุดที่ 1

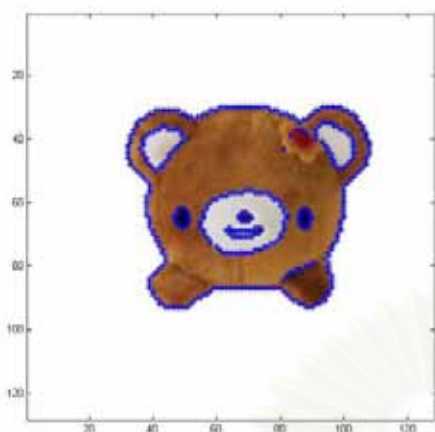
| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001658 | 726 | 0.001515 |
| 3 | 16384 | 0.004891 | 11639 | 0.005709 |
| 4 | 262144 | 0.034404 | 192003 | 0.038169 |
| 5 | 4194304 | 0.382911 | 3070261 | 0.40797 |
| 6 | 67108864 | 5.718939 | 49103379 | 5.549227 |
| 7 | 1073741824 | 86.61494 | 785792731 | 86.009534 |

ตารางที่ 4.4 แสดงความผิดพลาดในการจับคู่เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 1

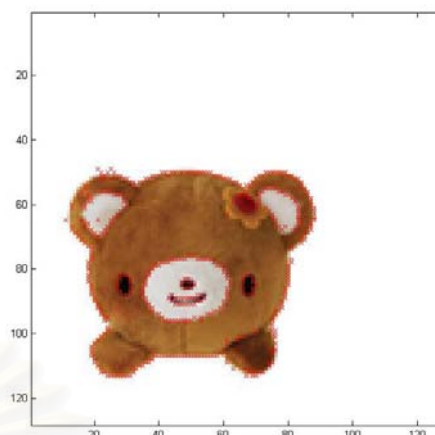
| จำนวนจุดภาพ | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-------------|-----------------|---------|--------------------------------|---------|
| | 284 | 2719 | 284 | 2719 |
| X axis | 0.17606 | 0.29754 | 0.0442254 | 0.17396 |
| Y axis | 0.16901 | 0.5043 | 0.049296 | 0.24347 |

ตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคุณภาพ ตามลำดับ โดยหน่วยของเวลาเป็นวินาที และตารางที่ 4.4 แสดงเปรียบเทียบความผิดพลาดในการจับคู่ โดยจะเปรียบเทียบเฉพาะจุดบริเวณขอบของวัตถุ (284 จุดภาพ) และเปรียบเทียบจุดทั้งหมดบนวัตถุ (2719 จุดภาพ)

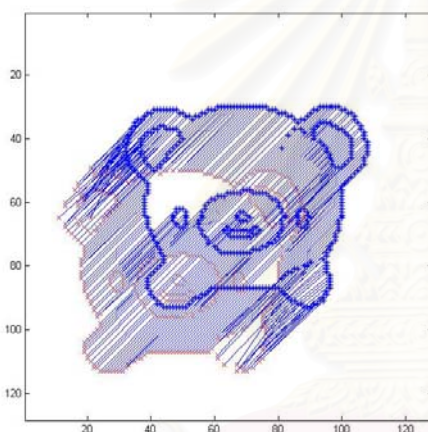
4.2.2 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 2



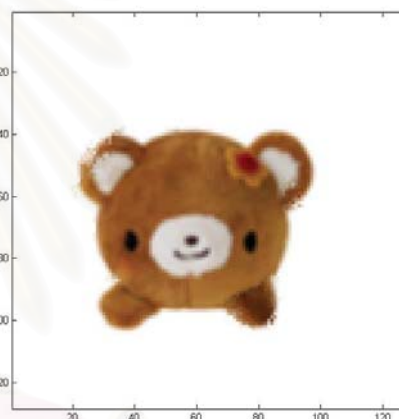
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



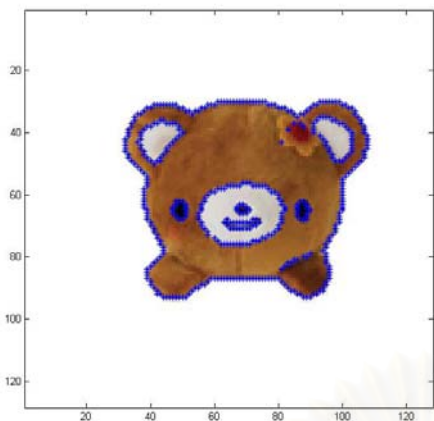
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



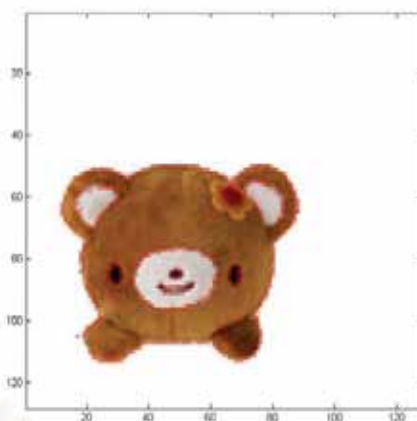
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.11 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 2

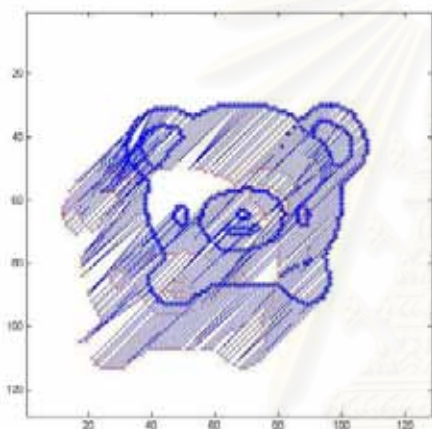
จากรูปที่ 4.11 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 2 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.11 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่ใช้จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.11 (ข) ส่วนรูปที่ 4.11 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.11 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.12 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับจากภาพชุดที่ 2

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 2 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.12 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่ใช้จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.12 (ข) ส่วนรูปที่ 4.12 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.12 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 2

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.166634 | 85 | 0.162984 |
| 3 | 1868 | 0.429406 | 1051 | 0.266808 |
| 4 | 12181 | 2.636221 | 9332 | 2.148017 |
| 5 | 69447 | 15.00804 | 54691 | 12.52258 |
| 6 | 282088 | 60.852578 | 244525 | 55.77217 |
| 7 | 1202442 | 260.74211 | 1104139 | 252.9877 |

ตารางที่ 4.6 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 2

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.04349 | 56 | 0.030501 |
| 3 | 1963 | 0.440888 | 1307 | 0.313278 |
| 4 | 11763 | 2.536985 | 10364 | 2.372186 |
| 5 | 62454 | 13.475716 | 56516 | 12.88166 |
| 6 | 274482 | 58.958689 | 256768 | 58.91953 |
| 7 | 1230578 | 266.65143 | 1162118 | 266.9517 |

ตารางที่ 4.7 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคุณภาพของภาพชุดที่ 2

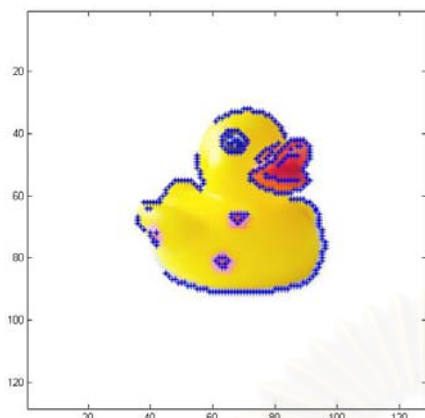
| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001421 | 677 | 0.001503 |
| 3 | 16384 | 0.005032 | 10874 | 0.005882 |
| 4 | 262144 | 0.034399 | 166522 | 0.037357 |
| 5 | 4194304 | 0.385553 | 2636515 | 0.385754 |
| 6 | 67108864 | 5.379892 | 41748726 | 5.319164 |
| 7 | 1073741824 | 86.201267 | 667436594 | 81.95695 |

ตารางที่ 4.8 แสดงความผิดพลาดในการจับคู่เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 2

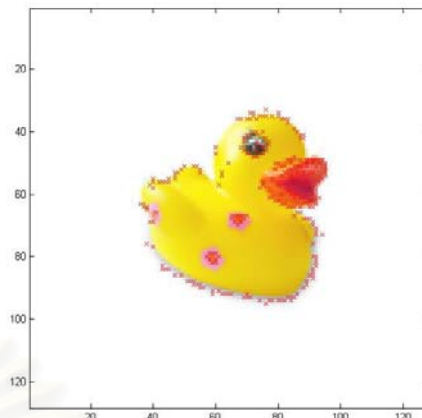
| จำนวนจุดภาพ | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-------------|-----------------|---------|--------------------------------|---------|
| | 448 | 3944 | 448 | 3944 |
| X axis | 0.33929 | 0.22972 | 0.41741 | 0.33722 |
| Y axis | 0.3192 | 0.20842 | 0.34375 | 0.38261 |

ตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคุณภาพ ตามลำดับ โดยหน่วยของเวลาเป็นวินาที และตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบความผิดพลาดในการจับคู่ โดยจะเปรียบเทียบเฉพาะจุดบริเวณขอบของวัตถุ (448 จุดภาพ) และเปรียบเทียบจุดทั้งหมดบนวัตถุ (3944 จุดภาพ)

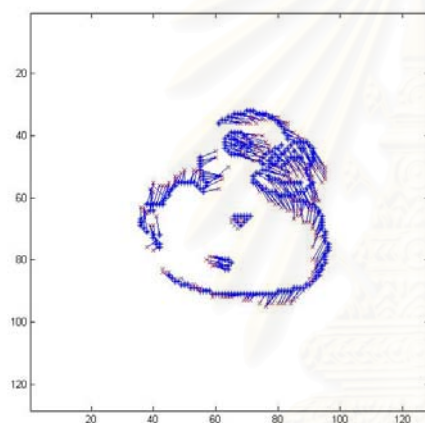
4.2.3 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 3



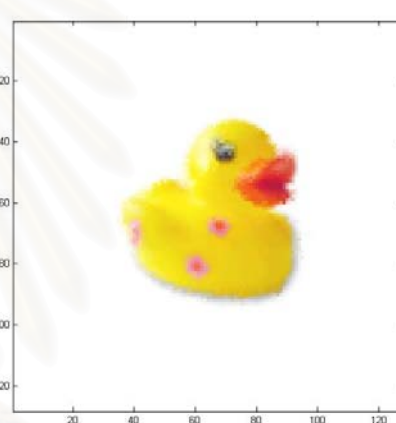
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



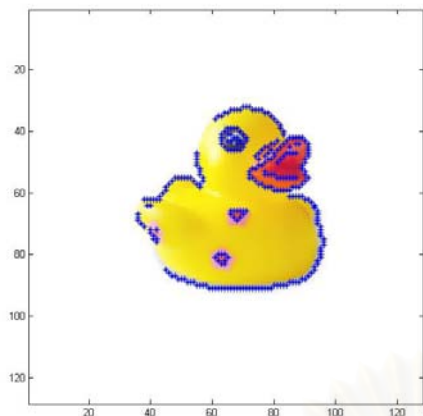
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



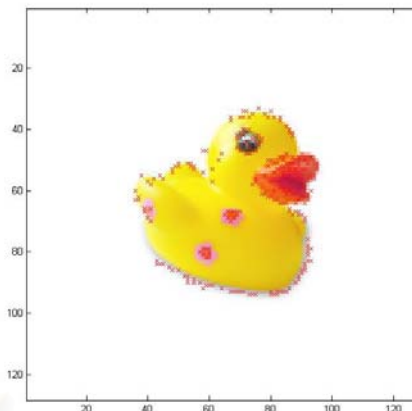
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.13 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 3

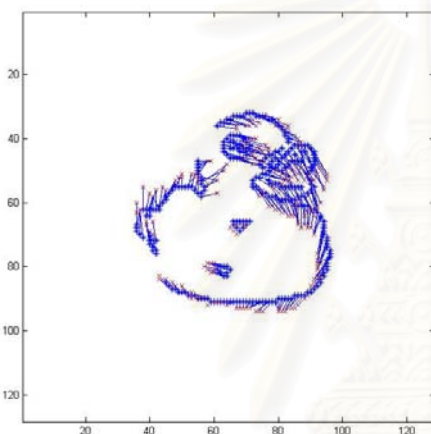
จากรูปที่ 4.13 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 3 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.13 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่ใช้จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.13 (ข) ส่วนในรูปที่ 4.13 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.13 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



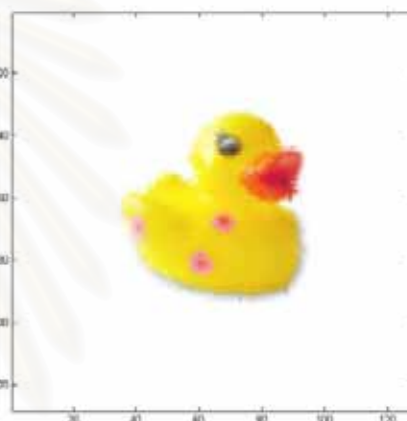
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.14 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตพร้อมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 3

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตพร้อมกับเซตระดับ โดยภาพชุดที่ 3 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.14 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่ใช้จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูป 4.14 (ข) ส่วนรูปที่ 4.14 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.14 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 3

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.16493 | 120 | 0.157208 |
| 3 | 1545 | 0.359039 | 1186 | 0.281045 |
| 4 | 10130 | 2.214578 | 8723 | 1.935108 |
| 5 | 41348 | 11.39142 | 47481 | 10.34034 |
| 6 | 250399 | 53.50878 | 233015 | 50.17304 |
| 7 | 1150161 | 248.5295 | 1104254 | 240.3372 |

ตารางที่ 4.10 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 3

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.044169 | 102 | 0.035158 |
| 3 | 1402 | 0.323284 | 1107 | 0.261721 |
| 4 | 9501 | 2.086693 | 8153 | 1.811543 |
| 5 | 51371 | 11.26935 | 47390 | 10.37137 |
| 6 | 254576 | 54.44754 | 243615 | 52.33231 |
| 7 | 1200653 | 276.7656 | 1157626 | 249.8308 |

ตารางที่ 4.11 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคุณภาพของภาพชุดที่ 3

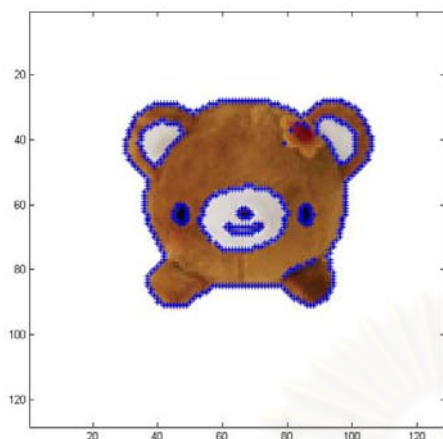
| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001379 | 912 | 0.001524 |
| 3 | 16384 | 0.005041 | 12935 | 0.005003 |
| 4 | 262144 | 0.034558 | 195846 | 0.03373 |
| 5 | 4194304 | 0.380378 | 3111853 | 0.374033 |
| 6 | 67108864 | 5.355813 | 49691116 | 5.163866 |
| 7 | 1073741824 | 85.76654 | 795039887 | 84.62133 |

ตารางที่ 4.12 แสดงความผิดพลาดในการจับคู่เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 3

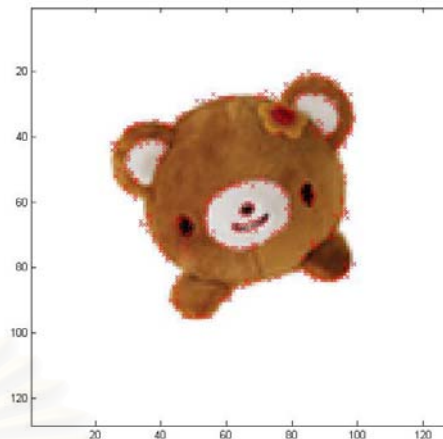
| จำนวนจุดภาพ | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-------------|-----------------|---------|--------------------------------|---------|
| | 284 | 2719 | 284 | 2719 |
| X axis | 1.7756 | 1.1947 | 1.7919 | 1.2172 |
| Y axis | 1.274 | 0.96082 | 1.0607 | 0.94554 |

ตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.11 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคุณภาพ ตามลำดับ โดยหน่วยของเวลาเป็นวินาที และตารางที่ 4.12 แสดงเปรียบเทียบความผิดพลาดในการจับคู่ โดยจะเปรียบเทียบเฉพาะจุดบริเวณขอบของวัตถุ (284 จุดภาพ) และเปรียบเทียบจุดทั้งหมดบนวัตถุ (2719 จุดภาพ)

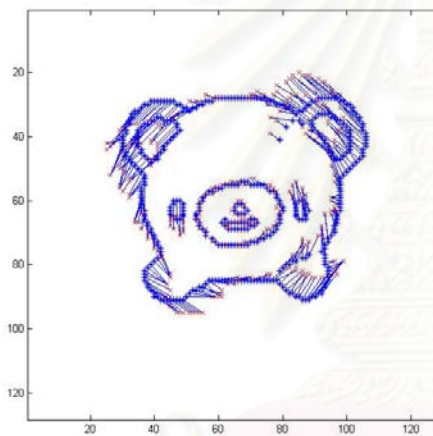
4.2.4 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 4



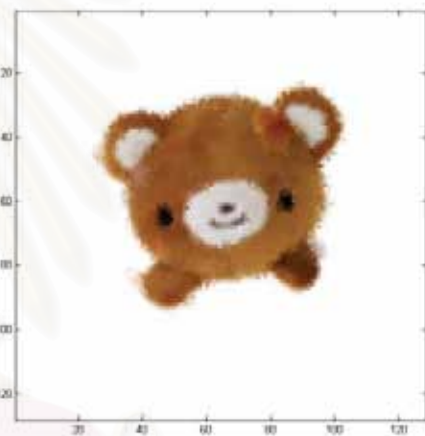
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



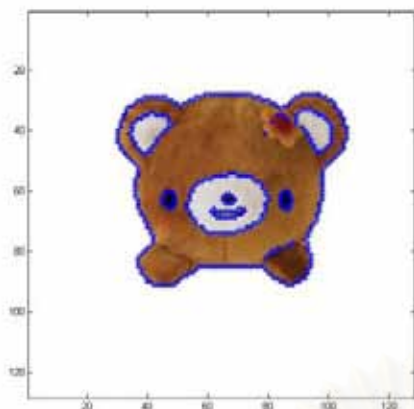
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



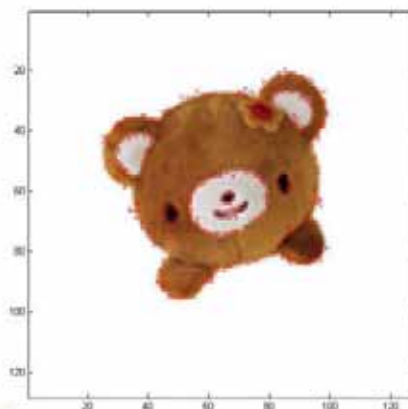
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.15 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 4

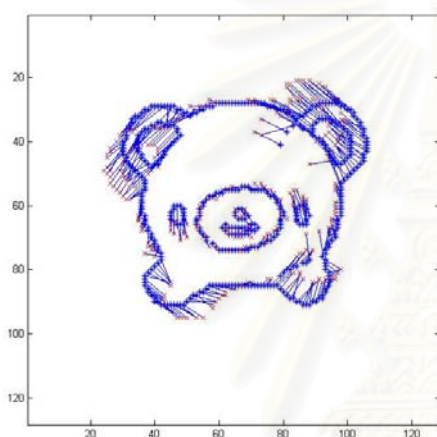
จากรูปที่ 4.15 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตโดยภาพชุดที่ 4 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.15 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.15 (ข) ส่วนรูปที่ 4.15 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.15 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



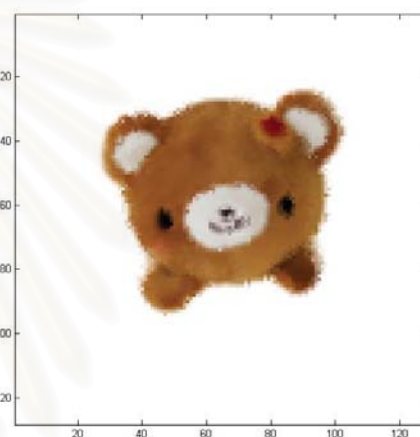
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.16 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 4

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ โดยภาพชุดที่ 4 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.16 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.16 (ข) ส่วนรูปที่ 4.16 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.16 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 4

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.165814 | 79 | 0.160447 |
| 3 | 1525 | 0.361621 | 984 | 0.254435 |
| 4 | 10058 | 2.221746 | 7923 | 1.851562 |
| 5 | 55106 | 11.99636 | 45339 | 10.37047 |
| 6 | 260020 | 56.36479 | 232403 | 52.92747 |
| 7 | 1175181 | 258.7086 | 1084897 | 246.6502 |

ตารางที่ 4.14 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 4

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.44791 | 80 | 0.030125 |
| 3 | 1480 | 0.344361 | 1014 | 0.251811 |
| 4 | 10266 | 2.293247 | 8345 | 1.928692 |
| 5 | 54790 | 12.16785 | 47406 | 10.8227 |
| 6 | 263074 | 57.4466 | 257050 | 57.00112 |
| 7 | 1200653 | 270.303 | 1198977 | 270.1928 |

ตารางที่ 4.15 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคุณภาพของภาพชุดที่ 4

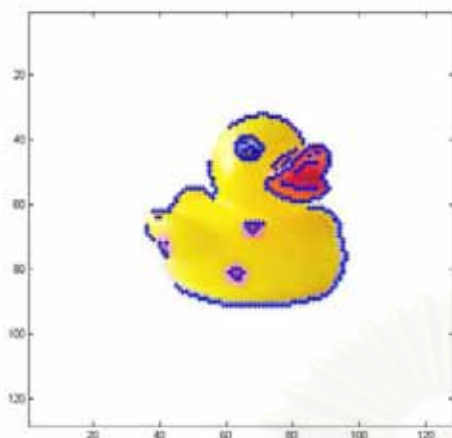
| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001715 | 652 | 0.001576 |
| 3 | 16384 | 0.00552 | 10315 | 0.005656 |
| 4 | 262144 | 0.035636 | 165606 | 0.037703 |
| 5 | 4194304 | 0.401585 | 2601935 | 0.387297 |
| 6 | 67108864 | 5.410295 | 41564901 | 5.246627 |
| 7 | 1073741824 | 82.49512 | 663975226 | 80.19666 |

ตารางที่ 4.16 แสดงความผิดพลาดในการจับคู่เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 4

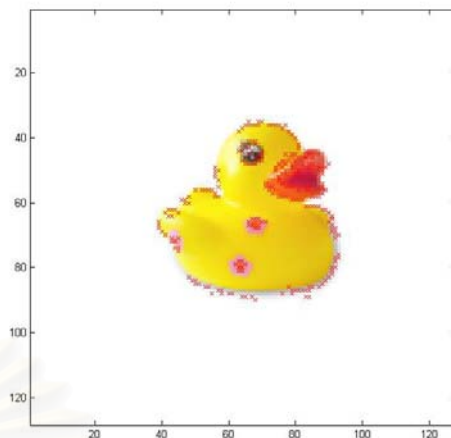
| จำนวนจุดภาพ | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-------------|-----------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| | จำนวนจุดภาพ | จำนวนจุดภาพ | จำนวนจุดภาพ | จำนวนจุดภาพ |
| จำนวนจุดภาพ | 448 | 3944 | 448 | 2719 |
| X axis | 1.6004 | 1.3774 | 1.7932 | 1.4683 |
| Y axis | 1.5666 | 1.3269 | 1.8899 | 1.5612 |

ตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคุณภาพ ตามลำดับ โดยมีหน่วยของเวลาเป็นวินาที และตารางที่ 4.16 แสดงเปรียบเทียบความผิดพลาดในการจับคู่โดยจะเปรียบเทียบเฉพาะจุดบริเวณขอบของวัตถุ (284 จุดภาพ) และเปรียบเทียบจุดทั้งหมดบนวัตถุ (2719 จุดภาพ)

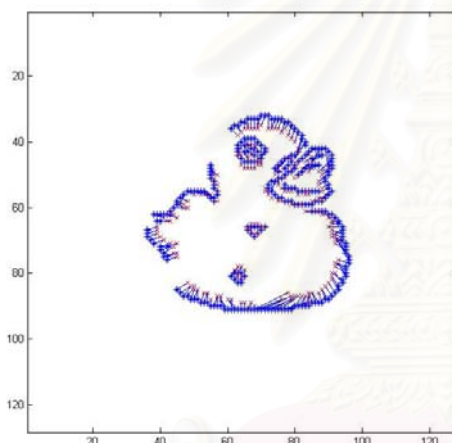
4.2.5 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 5



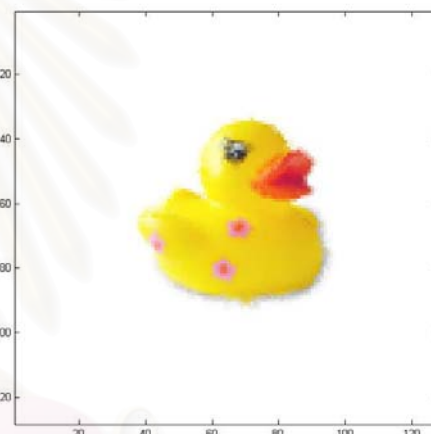
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



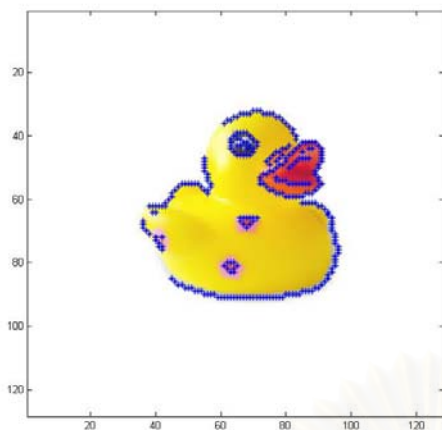
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



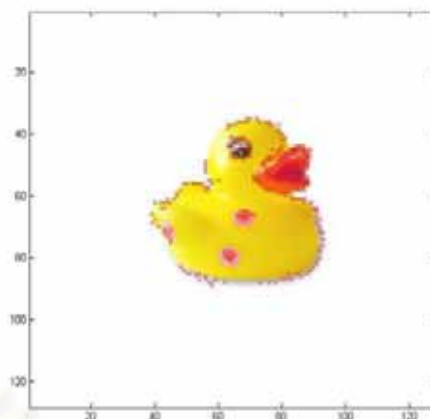
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.17 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 5

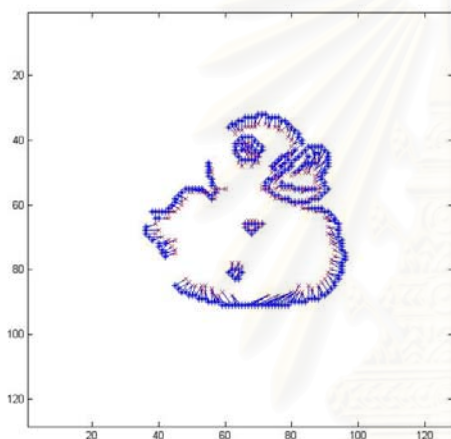
จากรูปที่ 4.17 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตโดยภาพชุดที่ 5 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.17 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.17 (ข) ส่วนรูปที่ 4.17 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.17 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



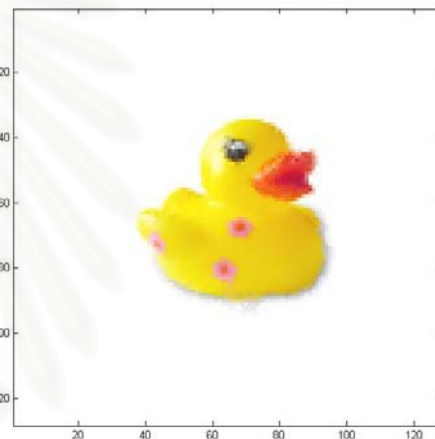
(ก) ภาพคันฉပ်



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.18 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 5

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ โดยภาพชุดที่ 5 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.18 (ก) เป็นจุดบนภาพคันฉပ်ที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.18 (ข) ส่วนรูปที่ 4.18 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.18 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพคันฉပ်และภาพปลายทาง

ตารางที่ 4.17 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 5

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.17044 | 119 | 0.166286 |
| 3 | 1377 | 0.344177 | 1084 | 0.273657 |
| 4 | 9546 | 2.208746 | 8453 | 1.950188 |
| 5 | 54290 | 12.38797 | 49388 | 11.1451 |
| 6 | 248184 | 56.99228 | 233427 | 52.2691 |
| 7 | 1107286 | 252.7943 | 1069770 | 240.02 |

ตารางที่ 4.18 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 5

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.044351 | 123 | 0.4014 |
| 3 | 1296 | 0.320014 | 1039 | 0.26082 |
| 4 | 8936 | 2.074131 | 8023 | 1.855377 |
| 5 | 51745 | 11.88272 | 49127 | 11.14389 |
| 6 | 252413 | 57.48991 | 248432 | 55.36345 |
| 7 | 1197660 | 272.5706 | 1189989 | 264.6592 |

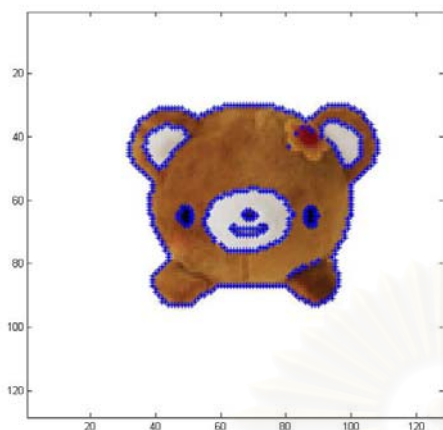
ตารางที่ 4.19 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคู่จุดภาพของภาพชุดที่ 5

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001393 | 911 | 0.001425 |
| 3 | 16384 | 0.005233 | 12866 | 0.005975 |
| 4 | 262144 | 0.038668 | 200996 | 0.038545 |
| 5 | 4194304 | 0.382911 | 3205351 | 0.411002 |
| 6 | 67108864 | 5.51321 | 51125845 | 5.610431 |
| 7 | 1073741824 | 84.81509 | 818016452 | 85.11762 |

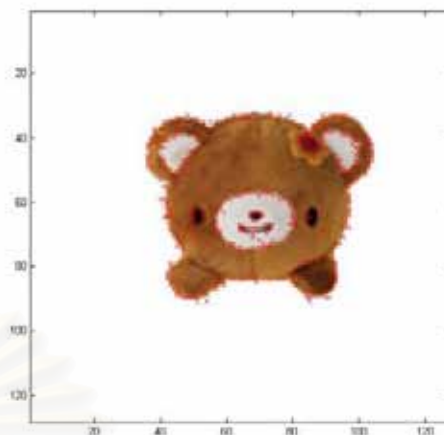
ตารางที่ 4.17 ถึงตารางที่ 4.19 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคู่จุดภาพ ตามลำดับ โดยมีหน่วยของเวลาเป็นวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

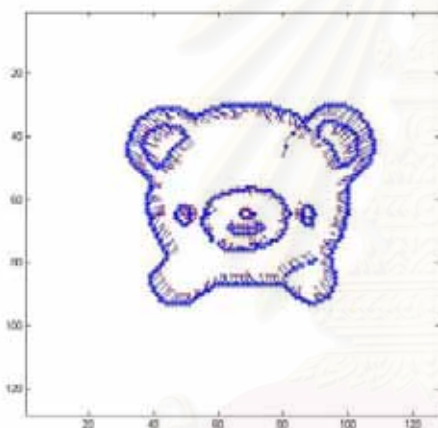
4.2.6 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 6



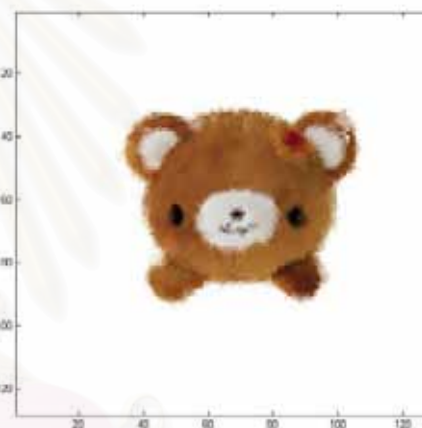
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



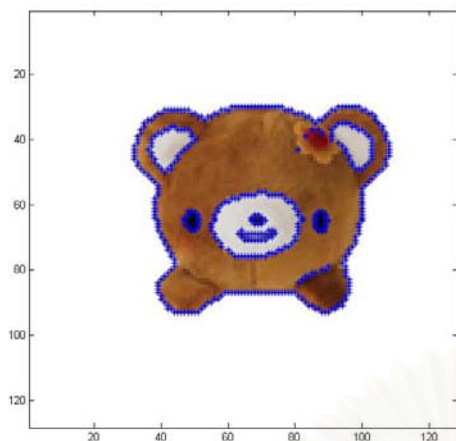
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



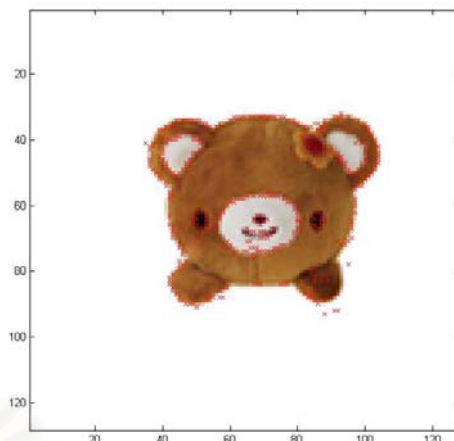
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.19 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 6

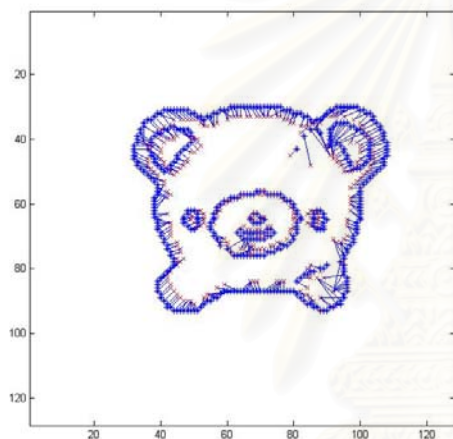
จากรูปที่ 4.19 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตโดยภาพชุดที่ 6 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.19 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.19 (ข) ส่วนรูปที่ 4.19 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.19 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



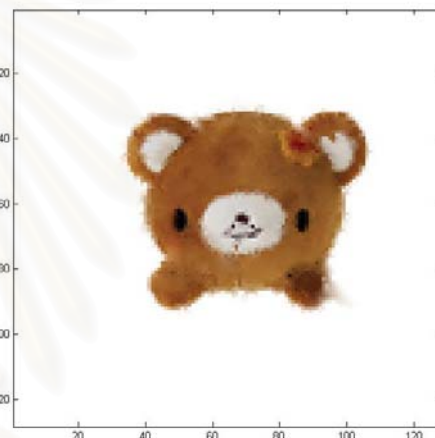
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.20 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 6

จากรูปที่ 4.20 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ โดยภาพชุดที่ 6 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.20 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.20 (ข) ส่วนรูปที่ 4.20 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.20 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

ตารางที่ 4.20 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 6

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.169787 | 94 | 0.168806 |
| 3 | 1374 | 0.338283 | 1001 | 0.253127 |
| 4 | 9857 | 2.236297 | 8287 | 1.929809 |
| 5 | 55735 | 12.33754 | 48937 | 11.15636 |
| 6 | 266952 | 58.49243 | 242742 | 54.6257 |
| 7 | 1215935 | 268.6846 | 1123700 | 252.5963 |

ตารางที่ 4.21 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 6

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.046729 | 80 | 0.308 |
| 3 | 1374 | 0.341899 | 1109 | 0.256456 |
| 4 | 9752 | 2.277842 | 8157 | 1.881987 |
| 5 | 53455 | 12.38184 | 47979 | 10.87932 |
| 6 | 266858 | 60.95863 | 248924 | 55.53907 |
| 7 | 1270442 | 291.4139 | 1226516 | 274.1549 |

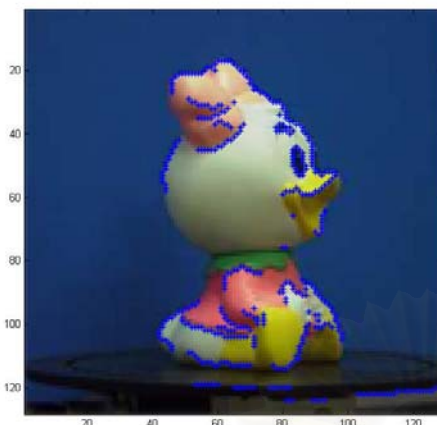
ตารางที่ 4.22 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคู่จุดภาพของภาพชุดที่ 6

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับและตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|----------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001418 | 726 | 0.001896 |
| 3 | 16384 | 0.005002 | 11547 | 0.006138 |
| 4 | 262144 | 0.034333 | 182285 | 0.038359 |
| 5 | 4194304 | 0.380981 | 2896946 | 0.397376 |
| 6 | 67108864 | 5.657334 | 46235973 | 5.414047 |
| 7 | 1073741824 | 85.15072 | 740437436 | 84.82959 |

ตารางที่ 4.20 ถึงตารางที่ 4.22 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคู่จุดภาพ ตามลำดับ โดยมีหน่วยของเวลาเป็นวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

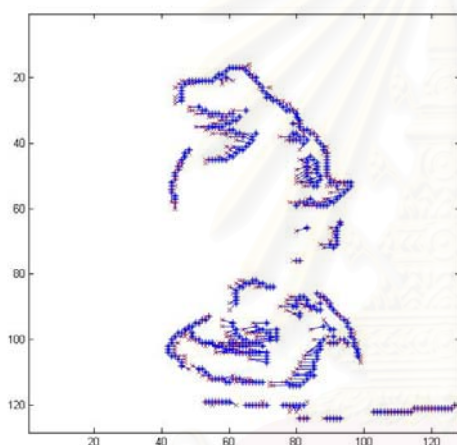
4.2.7 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 7



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



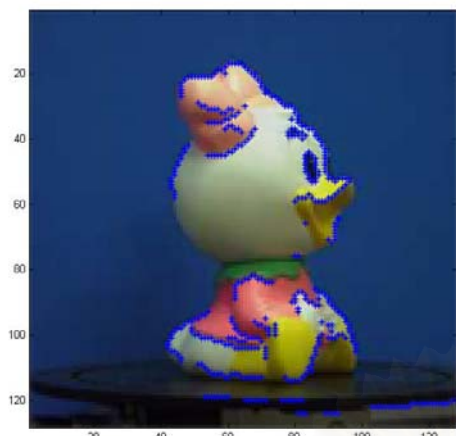
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.21 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 4

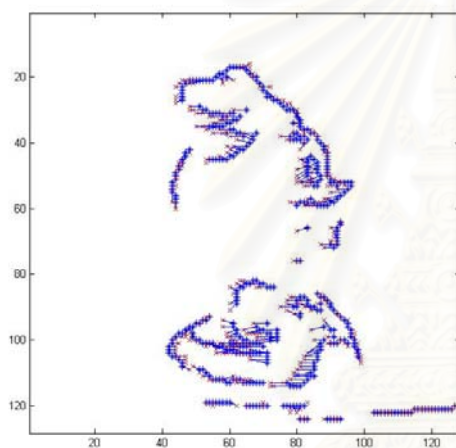
จากรูปที่ 4.21 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตโดยภาพชุดที่ 7 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.21 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.21 (ข) ส่วนรูปที่ 4.21 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.21 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.22 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 4

จากรูปที่ 4.22 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ โดยภาพชุดที่ 7 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.22 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.22 (ข) ส่วนรูปที่ 4.22 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.22 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

ตารางที่ 4.23 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 7

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.164344 | 75 | 0.15838 |
| 3 | 1612 | 0.377602 | 898 | 0.228026 |
| 4 | 10333 | 2.29855 | 7226 | 1.687339 |
| 5 | 54816 | 12.11267 | 42011 | 9.610817 |
| 6 | 319788 | 58.01156 | 224789 | 50.78015 |
| 7 | 1185016 | 262.0494 | 1066595 | 240.6721 |

ตารางที่ 4.24 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 7

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.046258 | 58 | 0.025915 |
| 3 | 1561 | 0.392633 | 873 | 0.221997 |
| 4 | 9983 | 2.420391 | 7093 | 1.649176 |
| 5 | 51821 | 12.41496 | 40872 | 9.350868 |
| 6 | 245438 | 58.32339 | 211777 | 47.80762 |
| 7 | 1121117 | 269.0015 | 1102093 | 249.5163 |

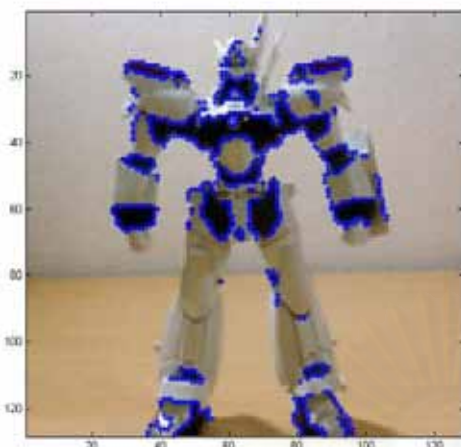
ตารางที่ 4.25 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคู่จุดภาพของภาพชุดที่ 7

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับและตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|----------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001378 | 483 | 0.001386 |
| 3 | 16384 | 0.004926 | 7598 | 0.005493 |
| 4 | 262144 | 0.034251 | 121673 | 0.036475 |
| 5 | 4194304 | 0.379772 | 1914543 | 0.356483 |
| 6 | 67108864 | 5.4122 | 30803469 | 5.057713 |
| 7 | 1073741824 | 85.28098 | 491851507 | 74.34286 |

ตารางที่ 4.23 ถึงตารางที่ 4.25 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคู่จุดภาพ ตามลำดับ โดยมีหน่วยของเวลาเป็นวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

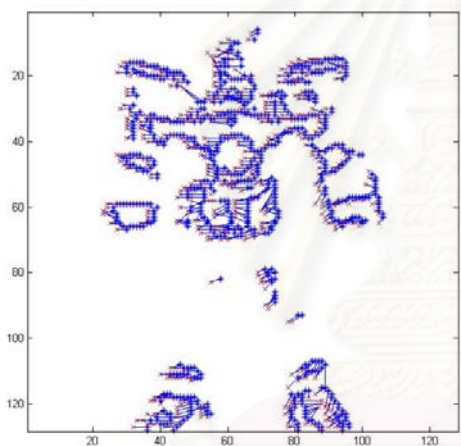
4.2.8 ผลการทดลองของภาพชุดที่ 8



(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



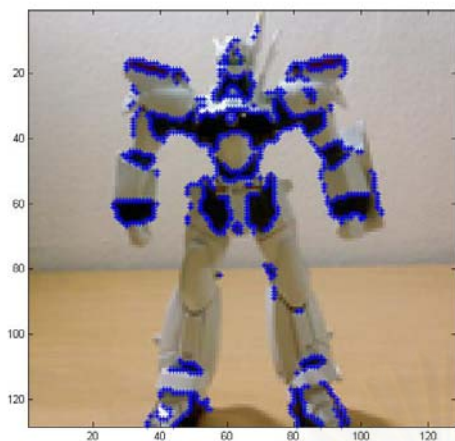
(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



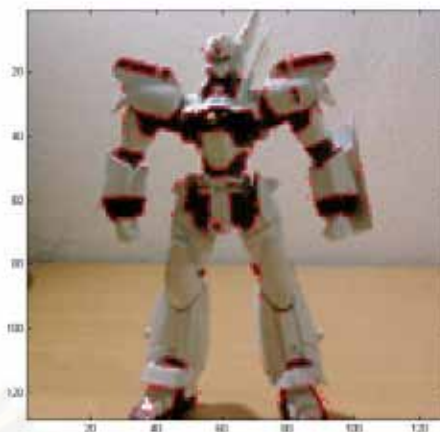
(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.23 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตของภาพชุดที่ 8

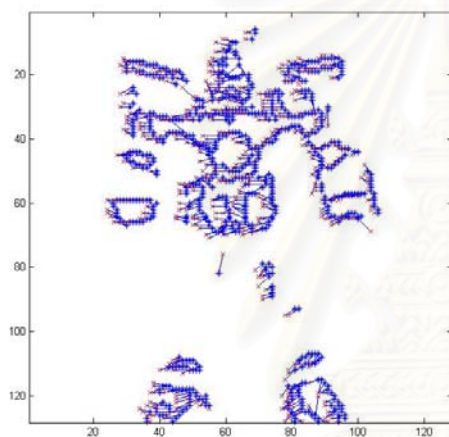
จากรูปที่ 4.23 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตโดยภาพชุดที่ 8 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.23 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.23 (ข) ส่วนรูปที่ 4.23 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.23 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง



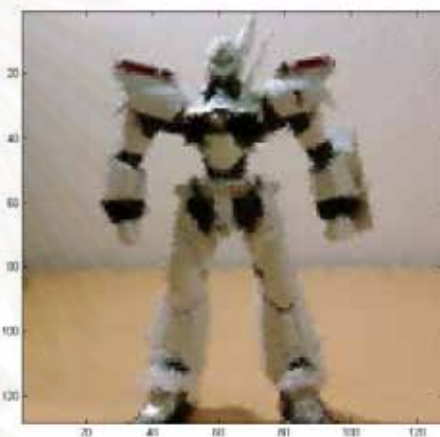
(ก) ภาพต้นฉบับ



(ข) ภาพปลายทาง



(ค) ภาพแสดงการลงจุดเปรียบเทียบ



(ง) ภาพระหว่างกลาง

รูปที่ 4.24 แสดงผลที่ได้จากการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับของภาพชุดที่ 8

จากรูปที่ 4.24 แสดงผลที่ได้ของการจับคู่ด้วยตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ โดยภาพชุดที่ 8 โดยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.24 (ก) เป็นจุดบนภาพต้นฉบับที่จับคู่กับจุดสีแดงบนภาพปลายทางภาพในรูปที่ 4.24 (ข) ส่วนรูปที่ 4.24 (ค) แสดงการลงจุดเปรียบเทียบการจับคู่ และรูปที่ 4.24 (ง) แสดงภาพระหว่างกลางที่สร้างขึ้นจากภาพต้นฉบับและภาพปลายทาง

ตารางที่ 4.26 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผันของภาพชุดที่ 8

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.251246 | 112 | 0.165352 |
| 3 | 1608 | 0.384759 | 1127 | 0.276687 |
| 4 | 10591 | 2.398365 | 7716 | 1.794321 |
| 5 | 62863 | 14.02885 | 46046 | 10.49856 |
| 6 | 319788 | 70.46093 | 242252 | 54.29171 |
| 7 | 1643412 | 361.2558 | 1270550 | 283.7897 |

ตารางที่ 4.27 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบไปข้างหน้าของภาพชุดที่ 8

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|--------------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 144 | 0.043328 | 104 | 0.034967 |
| 3 | 1458 | 0.348788 | 1080 | 0.265129 |
| 4 | 9948 | 2.260818 | 7816 | 1.791062 |
| 5 | 59942 | 13.46881 | 47574 | 10.72482 |
| 6 | 293614 | 64.9438 | 240251 | 53.6774 |
| 7 | 1424462 | 314.8839 | 1299907 | 289.2801 |

ตารางที่ 4.28 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤตและวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการปรับคู่จุดภาพของภาพชุดที่ 8

| ลำดับชั้น | ตัวกรองจุดวิกฤต | | เซตระดับและตัวกรองจุดวิกฤต | |
|-----------|-----------------|------------|----------------------------|------------|
| | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ | จำนวนจุดที่ใช้ | เวลาที่ใช้ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1024 | 0.001406 | 662 | 0.001539 |
| 3 | 16384 | 0.005062 | 9006 | 0.005579 |
| 4 | 262144 | 0.035424 | 141426 | 0.03729 |
| 5 | 4194304 | 0.383072 | 2247331 | 0.378451 |
| 6 | 67108864 | 5.374833 | 35990577 | 5.055539 |
| 7 | 1073741824 | 84.53442 | 573883054 | 75.09787 |

ตารางที่ 4.26 ถึงตารางที่ 4.28 แสดงจำนวนจุดและเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีตัวกรองจุดวิกฤต และวิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับในขั้นตอนการจับคู่แบบผกผัน การจับคู่แบบไปข้างหน้า และการปรับคู่จุดภาพ ตามลำดับ โดยมีหน่วยของเวลาเป็นวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบจำนวนจุด และเวลาระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตจากตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.7, ตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.11, ตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15, ตารางที่ 4.17 ถึงตารางที่ 4.19, ตารางที่ 4.20 ถึง ตารางที่ 4.22, ตารางที่ 4.23 ถึงตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26 ถึงตารางที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าการใช้เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตสามารถที่จะลดจำนวนจุดที่ใช้ในการพิจารณาถึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง

ตารางที่ 4.29 ถึงตารางที่ 4.30 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณร่วมเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตของแต่ละการทดลองทั้งสามขั้นตอน โดยมีหน่วยของเวลาเป็นวินาที โดยตารางที่ 4.29 เป็นตารางเปรียบเทียบของภาพทดสอบการแปลงสัมพรรค ตารางที่ 4.30 เป็นตารางเปรียบเทียบของภาพทั่วไป จะเห็นว่าภาพที่มีรายละเอียดของภาพจำนวนมาก การนำเซตระดับเข้ามาช่วยพิจารณาสามารถที่ลดจำนวนจุดที่ใช้พิจารณาถึงได้มาก ดังในการทดลองชุดที่ 8 เป็นภาพที่มีรายละเอียดจำนวนมาก สามารถลดเวลาลงไปถึงประมาณ 147 วินาทีและในการทดลองชุดที่ 7 สามารถลดเวลาลงไปถึง 77 วินาที ส่วนในการทดลองที่ 1 ถึง 6 สามารถลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงประมาณ 20 ถึง 30 วินาที สำหรับการนำเซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตจะต้องใช้เวลาในการคำนวณหาเซตระดับประมาณ 0.8 - 1 วินาทีสำหรับรูปภาพขนาด 128*128

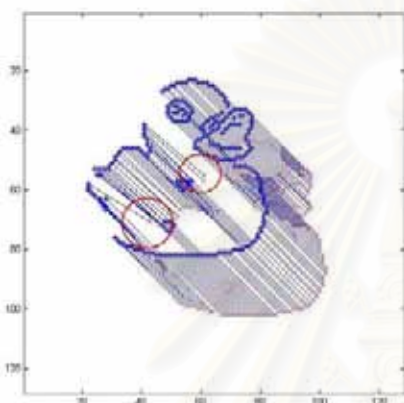
ตารางที่ 4.29 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณร่วมเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตของภาพในการดำเนินการแปลงสัมพรรค

| การทดลองภาพชุดที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ตัวกรองจุดวิกฤต | 784.94244 | 773.9498 | 735.142 | 761.1718 | 760.0361 | 794.8306 |
| เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | 765.1832 | 753.0358 | 712.6439 | 738.3173 | 730.6934 | 754.4372 |

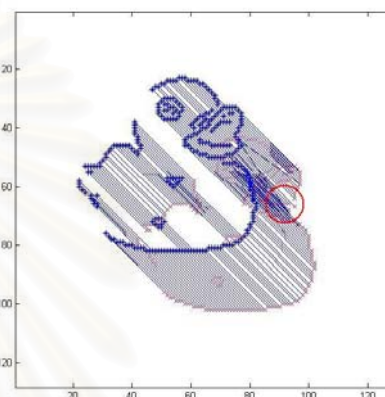
ตารางที่ 4.30 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณร่วมเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตของภาพทั่วไป

| การทดลองภาพชุดที่ | 7 | 8 |
|--------------------------------|----------|-----------|
| ตัวกรองจุดวิกฤต | 768.7267 | 935.06357 |
| เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤต | 691.5091 | 787.166 |

ผลการทดลองเปรียบเทียบการจับคู่จุดภาพ และภาพระหว่างกลางจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยค่าความผิดพลาดในการจับคู่จุดภาพเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวกรองจุดวิกฤต และการใช้เซตระดับร่วมกับตัวกรองจุดวิกฤตของภาพที่ทำการเลื่อนที่ และการหมุนจากตารางที่ 4.4, ตารางที่ 4.8, ตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ผลการจับคู่ของภาพที่ทำการหมุนจะมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างมาก เนื่องจากการทดลองได้กำหนดค่าตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ในสมการหาค่าพลังงานที่ใช้ในการจับคู่ (สมการที่ 2.23) ซึ่งอาจจะต้องมีเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรให้เหมาะสม

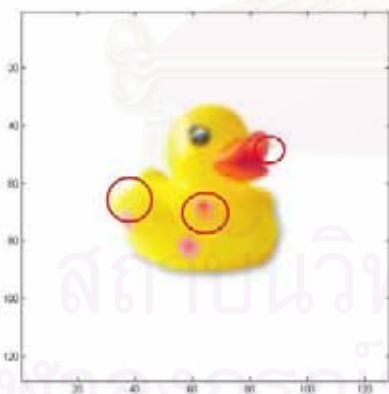


(ก) วิธีตัวกรองจุดวิกฤต

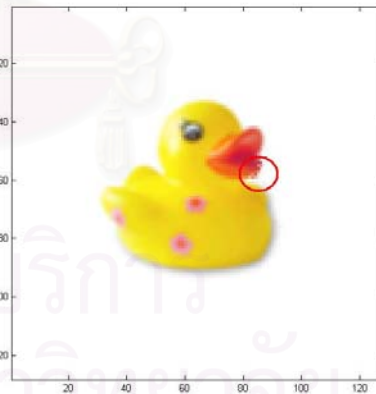


(ข) วิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบการจับคู่ของภาพชุดที่ 1



(ก) วิธีตัวกรองจุดวิกฤต

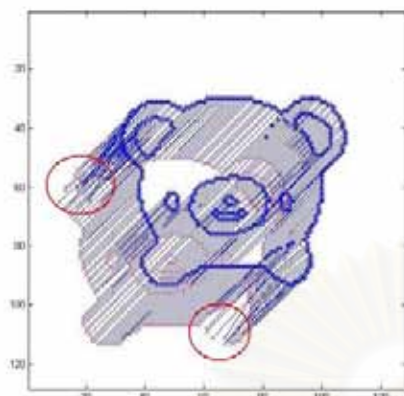


(ข) วิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ

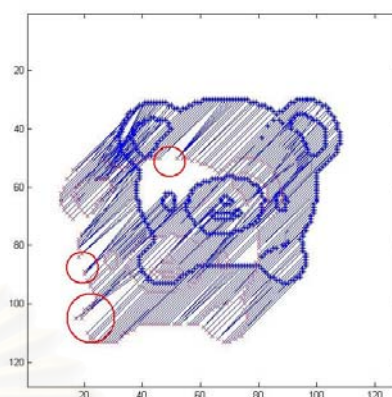
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบภาพประมาณค่าในช่วงของภาพชุดที่ 1

รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 เปรียบเทียบผลจากการจับคู่จาก 2 วิธีของภาพที่มีการเลื่อนตำแหน่ง (ภาพชุดที่ 1 และ 2) โดยบริเวณวงกลม คือ บริเวณที่มีการจับคู่ที่ผิดพลาด โดยการใช้เซตระดับจะช่วยแก้ไขการจับคู่ให้มีความถูกต้องมากขึ้น แต่การใช้เซตระดับจะมีปัญหาจับคู่

ผิดพลาดบริเวณขอบของวัตถุ เนื่องจากบริเวณขอบของวัตถุมีค่าสีแตกต่างจากตัววัตถุทำให้มีการแบ่งเซตระดับออกคนละระดับจากตัววัตถุจึงเกิดการคำนวณผิดพลาดขึ้น

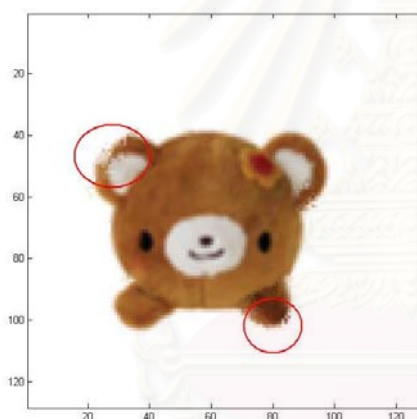


(ก) วิธีตัวกรองจุดวิกฤต

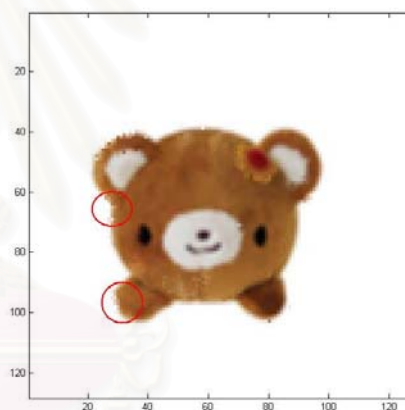


(ข) วิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบการจับคู่ของภาพชุดที่ 2



(ก) วิธีตัวกรองจุดวิกฤต



(ข) วิธีตัวกรองจุดวิกฤตร่วมกับเซตระดับ

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบภาพประมาณค่าในช่วงของภาพชุดที่ 2

รูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 เปรียบเทียบผลการสร้างภาพประมาณค่าในช่วงของ 2 วิธี บริเวณวงกลมแสดงบริเวณที่ไม่สอดคล้อง ภาพประมาณค่าในช่วงมีภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีที่ใช้เพียงตัวกรองจุดวิกฤตจะมีบริเวณที่ไม่สอดคล้องกันมากกว่าวิธีที่นำเซตระดับ เนื่องจากการนำเซตระดับเข้ามาช่วยจะทำให้บริเวณที่ไม่สอดคล้องกันในภาพลดลง แต่อย่างไรก็ตามอาจจะยังมีส่วนที่ไม่สอดคล้องขึ้นได้เนื่องจากการจับคู่ที่ผิดพลาดบริเวณขอบวัตถุ

การทดลองของภาพที่มีการปรับขนาดของวัตถุภายในภาพ และภาพทั่วไปผลของการจับคู่ภาพ และภาพประมาณค่าในช่วงของ 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก โดยอาจจะต้องมีเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรให้เหมาะสมเพื่อให้ภาพมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการหลอมภาพโดยใช้ตัวกรองจุกวิกฤตหลายความละเอียดร่วมกับเซตระดับ การใช้ตัวกรองจุกวิกฤตหลายความละเอียดในการหลอมภาพเพียงอย่างเดียวจะทำให้การพิจารณาจับคู่ตำแหน่งของแต่ละจุดบนภาพในแต่ละลำดับชั้น ทำให้มีความซ้ำซ้อนของข้อมูลและเสียเวลาในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงอัลกอริทึมสำหรับการจับคู่ตำแหน่งรูปภาพของการใช้ตัวกรองจุกวิกฤตหลายความละเอียด โดยอาศัยหลักการของเซตระดับมาช่วยในการพิจารณาขอบเขตที่เป็นไปได้ในการจับคู่แทนที่จะพิจารณาทุกจุดในรูปภาพ

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การนำเซตระดับเข้ามาใช้ร่วมกับตัวกรองจุกวิกฤตในการหลอมภาพสามารถที่จะลดจำนวนจุดภาพที่ต้องพิจารณาในการจับคู่ลง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลง โดยผลลัพธ์ที่ได้ในการจับคู่ และภาพที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงมีความผิดพลาดใกล้เคียงกับวิธีเดิมที่ใช้ตัวกรองจุกวิกฤตเพียงอย่างเดียว การนำเซตระดับเข้ามาใช้กับตัวกรองจุกวิกฤตในการหลอมภาพสามารถที่จะลดจำนวนจุดที่ใช้ในการคำนวณได้มาก ในกรณีที่ภาพสามารถแบ่งออกได้หลายเซตระดับ และมีขนาดใหญ่มากขึ้น การนำเซตระดับเข้ามาใช้กับตัวกรองจุกวิกฤตก็สามารถที่จะลดเวลาที่จะคำนวณลงได้มากตามไปด้วย เนื่องจากการที่ภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีการคำนวณหลายลำดับชั้นมากยิ่งขึ้น โดยในแต่ละลำดับชั้นที่มีความละเอียดที่สูงขึ้นก็จะมีจำนวนพิจารณาจุดภาพมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การนำเซตระดับมาใช้อังยังสามารถสร้างเส้นรอบบริเวณแต่ละบริเวณ หรือการแบ่งส่วนของภาพได้แบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ของการจับคู่และภาพประมาณค่าในช่วงยังขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าตัวแปรในสมการหาค่าพลังงานที่ใช้ในการจับคู่

ตารางที่ 5.1 เป็นตารางเปรียบเทียบการกำหนดคุณลักษณะ ความเหมือนจริง ความเร็วในการคำนวณ และปัญหาของวิธีการหลอมภาพแบบต่างๆ โดยจะเห็นว่าวิธีการหลอมภาพโดยนำเซตระดับมาใช้ร่วมกับตัวกรองจุกวิกฤตในการหลอมภาพจะนำเอาข้อดีของตัวกรองจุกวิกฤตเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ได้แก่ ภาพทั้งสองไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างของภาพที่เหมือนหรือคล้ายกัน ไม่จำกัดประเภทของรูปภาพ เช่น ใบหน้าคน ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องกำหนดและจับคู่คุณลักษณะ การนำเซตระดับเข้ามาใช้จะช่วยปรับปรุงตัวกรองจุกวิกฤตทำให้พิจารณาจุดที่จับคู่ น้อยลงส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณที่ลดลง

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบวิธีการหลอมภาพ

| วิธีการ | การกำหนดคุณลักษณะ | ความเหมือนจริง | ความเร็วในการคำนวณ | ปัญหา |
|------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------------------|--|
| เมซสามเหลี่ยม [13] | ตารางเมซสามเหลี่ยม | ต่ำ-ดี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ | เร็ว ขึ้นอยู่กับจำนวนจุด | การซ้อนทับของตารางโครงสร้างของภาพ |
| เมชสี่เหลี่ยม [4] | ตารางเมชสี่เหลี่ยม | ดี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ | เร็ว ขึ้นอยู่กับจำนวนจุด | โครงสร้างของภาพ |
| เส้นตรง [14] | เส้นตรง | ดี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ | ช้า ขึ้นอยู่กับจำนวนของเส้น | การคำนวณที่ช้า |
| เส้นโค้ง [15] | เส้นโค้ง | ดี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ | ช้า ขึ้นอยู่กับจำนวนของเส้น | การคำนวณที่ช้า |
| จุด [16] | จุด | ดี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ | ปานกลาง-เร็ว ขึ้นอยู่กับจำนวนจุด | การคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุด |
| เอฟดีอีเอ็น [17] | อัตโนมัติ | ปานกลาง - ดี | ช้า | ใช้ได้สำหรับรูปใบหน้าเท่านั้น |
| ซีพีเอฟ [11] | อัตโนมัติ | ปานกลาง - ดี | ช้า | การคำนวณที่ช้า และต้องการปรับค่าตัวแปร |
| ซีพีเอฟร่วมกับเซตระดับ | อัตโนมัติ | ปานกลาง - ดี | ช้าแต่เร็วกว่าซีพีเอฟ | การคำนวณที่ช้าแต่เร็วกว่าซีพีเอฟ และต้องการปรับค่าตัวแปร |

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานที่ควรจะศึกษาหรือพัฒนาต่อไป คือ

1. พัฒนาขั้นตอนของเซตระดับในการคำนวณหาค่า ϕ จากรูปภาพแบบอัตโนมัติ เพื่อจะได้แบ่งกลุ่มได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการกำหนดค่า ϕ ในบางครั้งอาจทำให้เกิดการแบ่งกลุ่มที่ไม่เหมาะสม เช่น บริเวณของขอบ ในการพัฒนาต่อสามารถทำได้โดยอาศัยการพิจารณาจากข้อมูลฮิสโตแกรม (Histogram) ของภาพ หรือพิจารณาโดยการนำข้อมูลของสีของภาพเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย

2. พัฒนาปรับปรุงวิธีการสร้างภาพระหว่างกลาง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นทำให้เกิดปัญหาความคมชัดของภาพประมาณค่าในช่วงที่สร้างขึ้น ดังนั้นในการพัฒนาต่อสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนวิธีการสร้างภาพโดยใช้การประมาณค่าในช่วงแบบอื่น เช่น การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นคู่ (Bilinear Interpolation)

รายการอ้างอิง

- [1] ปุณณรัตน์ พิชญ์ไพบุลย์. Computer Graphics สำหรับนักออกแบบ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [2] Scott Anderson. Morphing Magic. USA: Sams Publishing, 1993.
- [3] Wolberg, G. Image Morphing: A Survey. The Visual Computer (1998): 360-372.
- [4] Wolberg, G. Recent advances in image morphing. In Proceedings of Computer Graphics (SIGGRAPH) 26 (1992): 35-42.
- [5] Novins, K.; Arvo, J. The Morphological Cross-Dissolve. Conference Abstracts and Applications ACM SIGGRAPH (1999): 257.
- [6] มนต์ สัจวรศิลป์ และวรัตน์ ภัทรอมกุล. คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: อินโฟเพรส, 2543.
- [7] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods and Steven L. Eddins, Digital Image. Processing Using MATLAB. Prentice Hall, 2004.
- [8] Edward, H.; Adelson, C. H.; Anderson, J. R.; Bergen, P. J. Burt.; and Ogden, J. M. Pyramid Method in Image Processing. RCA Engineer 29 (1984): 33-41.
- [9] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods and Steven L. Eddins, Digital Image. Processing 2nd edition. Prentice Hall, 2002.
- [10] Shinagawa, Y.; and Habuka, K. Image Interpolation Using Enhanced Multiresolution Critical-Point Filter. International Journal of Computer Vision (2004): 19-35.
- [11] Shinagawa, Y.; and Kunii, T. L. Unconstrained Automatic Image Matching Using Multiresolutional Critical-Point Filter. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (1998): 994-1010.
- [12] Tsai, R.; and Osher, S. Level set methods and their applications in image science. Communications in Mathematical Sciences 623-656.
- [13] Goshtaby, A. Piecewise Linear Mapping Functions for Image Registration. Pattern Recognition (1986):459-466.
- [14] Beier, T.; Neely, S. Feature-based image metamorphosis. In Proceedings of Computer Graphics (SIGGRAPH '92) (1992): 35-42.
- [15] Hermann, B.; and Dietmar ,J. Image warping with feature curves. In Proceedings conference on computer graphics(SIGGRAPH) (2003): 199-202.

- [16] Arad, N.; Dyn, N.; Reinfeld, D.; and Yeshurin Y. Image warping by radial basis functions: application to facial expressions. CVGIP: Graphical Models and Image Processing (1994):161-172.
- [17] Karungaru, S.; Fukumi, M.; and Akamatsu, N. Automatic Face Metamorphosis in Color Images. Proc. of 2005 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (2005): 131-134.
- [18] Curand, J. Real-time object tracking using multi-resolution critical point filters. IEEE Int.Conf Robots and Automation(ICRA'03) (2003): 1682-1687.
- [19] Chambers, B.; Gans, N. R. ; Durand, J.; and Hutchinson, S. A. Dynamic feature point detection for visual servoing using multiresolution critical-point filters. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2003).
- [20] Chambers, B.; and Hutchinson, S. Integrated Tracking and Control Using Condensation-based Critical-Point Matching. Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (2004): 949-956.
- [21] Chambers, B., J. Point and windows based matching in images using critical point filters. Master's Thesis, Department of Electrical Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. 2004.
- [22] Mohanta, P.; Sen, A.; and Mukherjee, D. Segmentation of Images using Level Set Analysis. Indian Conference on computer vision, graphics & image processing(ICVGIP 2002) (2002).

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติพงษ์ ฐานะสุนทรฤกษ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จ การศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ใน สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย